

Cálculo de tasas de incisión a partir de travertinos fluviales. Aplicación a la gestión de residuos radiactivos

J.E. Ortiz, T. Torres, J. Llamas, A. Díaz-Bautista y L. Moreno

*Grupo de Estudios Ambientales. Laboratorio de Estratigrafía Biomolecular,
Dpto Ingeniería Geológica y Dpto Ingeniería Química y Combustibles*

Introducción

El estudio paleoambiental y paleoclimatológico de España, fue considerado parte del análisis de la seguridad de los repositorios de residuos radiactivos emprendida por ENRESA. La Unión Europea y distintas agencias nacionales, también comprendieron la importancia de este tema, contemplado en numerosos proyectos marco EURATOM y proyectos propios de ENRESA y del CSN en los que participó el Grupo de Estudios Ambientales a través del Laboratorio de Estratigrafía Biomolecular:

- Palaeoclimatological revision of climate evolution in the Western Mediterranean Region
- Evidency from Quaternary Infills Palaeohydrogeology (EQUIP)
- Sequential BIOSphere modelling function of Climate evolution models (BIOCLIM).
- Paleohydrogeological Data Analysis and Model Testing (PADAMOT).

- Datación de formaciones cuaternarias a partir de aminoácidos (ENRESA)
- Estudio paleoambiental de la mitad sur de la Península Ibérica (ENRESA)
- Paleoclima (ENRESA y CSN)

El aspecto básico del estudio paleoambiental, que tiene aplicación prospectiva, se basa en que el clima es un proceso cíclico y lo que ha ocurrido en el pasado volverá a ocurrir en el futuro. En este sentido el clima tiene una gran importancia en los procesos de erosión y denudación de la superficie terrestre y, por tanto, se hacía necesario determinar la profundidad del posible repositorio para el almacenamiento de residuos radiactivos fuera suficiente para que no se viera afectado por éstos. Una parte de estos estudios llevada a cabo por el GEA estuvo centrada en el cálculo de tasas de incisión del sistema fluvial de los ríos Guadiela, Escabas y Trabaque (Fig. 1) en el entorno de Priego (Cuenca).

A lo largo de los márgenes de estos ríos se encuentran sistemas de terrazas fluviales (antiguas llanuras de inundación) de naturaleza travertínica: con abundantes bioconstrucciones de origen algal y macrofitas acuáticas en las que aparecen numerosos restos fósiles de moluscos y crustáceos.

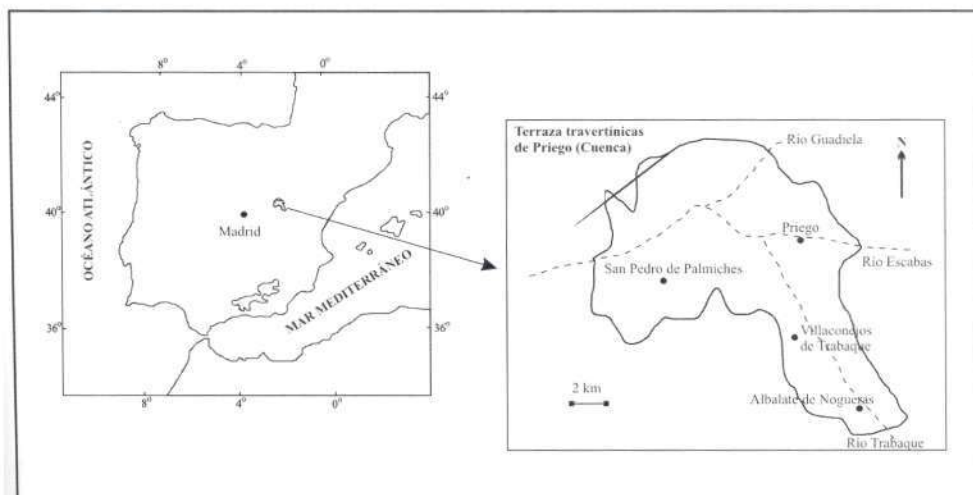


Figura 1. Situación geográfica de los ríos Guadiela, Escabas y Trabaque.

Mediante la datación por racemización de aminoácidos de estos restos se ha podido determinar la edad de los diferentes niveles y, dado, que se puede medir la altura sobre el thalweg (cauce) actual, se pudieran calcular las tasas de incisión durante los últimos 500.000 años.

Se establecieron seis niveles de terrazas en función de su altura relativa respecto al cauce del río (Fig. 2 y 3). Como se puede observar la altura relativa de los niveles del río Trabaque no coincide exactamente con la de sus equivalentes en los ríos Escabas-Guadiela. Ello es debido a su diferente dinámica fluvial: el río Trabaque es afluente del río Escabas y éste, a su vez, es afluente del río Guadiela. Para correlacionar los niveles de terrazas de los tres ríos se emplearon los cortes PR1, PR44, PR45 y PR46, ya que se sitúan en la confluencia de los ríos Escabas y Trabaque. En el río Trabaque se diferenciaron cinco niveles (T1 a T5), mientras que en los ríos Escabas-Guadiela se han diferenciado cuatro (T3 a T6). El nivel más bajo (T6) no está representado en el río Trabaque ya que posiblemente no haya incidido totalmente la última llanura aluvial que construyó.

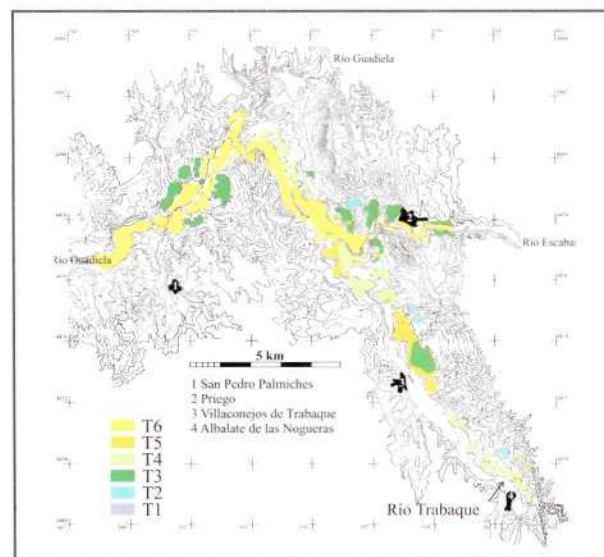


Figura 2. Alturas relativas de terrazas sobre el cuce actual del río.

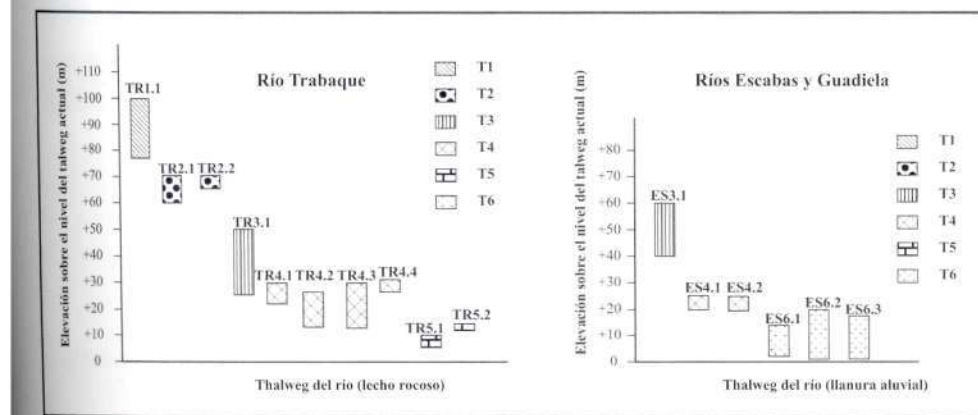


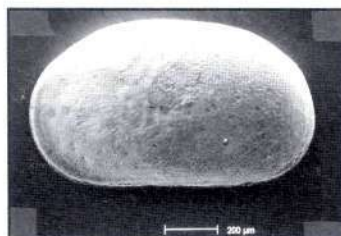
Figura 3. Distribución de las terrazas en el área de Priego.

Resultados y discusión

El método de datación por racemización de aminoácidos se basa en que los organismos vivos contienen solamente aminoácidos levógiros (L-aminoácidos) que gradualmente se transforman en D-aminoácidos después de la muerte, un proceso denominado racemización. Así, la relación de racemización (D/L) crece hasta que alcanza el valor de 1, que es cuando el proceso alcanza el equilibrio. Por tanto, dado que la racemización es un proceso que depende del tiempo se puede emplear para datar. El método de racemización de aminoácidos presenta algunas ventajas respecto a otros métodos de datación:

- Se pueden emplear diversos materiales, como moluscos, huesos y dientes, crustáceos, vegetales.
- Se requiere únicamente una pequeña cantidad de muestra, entre 5 y 10 mg (o incluso menor), (Kaufman y Manley, 1998).
- El rango de aplicación es muy diverso: el alcance de este método en la Península Ibérica sobrepasa el millón de años (Torres et al, 1997; Ortiz et al. 2002, 2004) aunque también se ha aplicado para datar muestras más recientes, del Holoceno (10.000 años) o incluso seculares o decadales (Goodfriend, 1991; Goodfriend, 1992; Goodfriend et al., 1992; Goodfriend et al., 1995). También tiene aplicación en la práctica forense (Ohtani et al., 1998).

Figura 4. Valva de ostrácodo de la especie *Cyprideis torosa*.



Para la determinación de la edad de los niveles travertínicos se emplearon gasterópodos u ostrácodos, pequeños crustáceos de concha calcítica (Fig. 4). En ella abundan aminoácidos (Ortiz et al., 2002), base del sistema de datación por análisis de racemización de aminoácidos, y con una sola valva se obtienen buenos resultados en un cromatógrafo líquido de altas prestaciones (HPLC).

NIVEL	D/L ASP	D/L GLU
PR1	0.491 ± 0.010	0.238 ± 0.000
PR4	0.484 ± 0.001	0.219 ± 0.000
PR5	0.559 ± 0.000	0.348 ± 0.000
PR6	0.333 ± 0.000	0.117 ± 0.000
PR7	0.375 ± 0.001	0.122 ± 0.008
PR12	0.184 ± 0.000	0.048 ± 0.000
PR13	0.334 ± 0.000	0.116 ± 0.000
PR41	0.334 ± 0.000	0.115 ± 0.000
PR42	0.403 ± 0.000	0.136 ± 0.000
PR43	0.189 ± 0.000	0.049 ± 0.000
PR44	0.482 ± 0.014	0.228 ± 0.001
PR46	0.426 ± 0.000	0.159 ± 0.000
PR56	0.365 ± 0.000	0.128 ± 0.000
PR66	0.327 ± 0.000	0.111 ± 0.000
PR69	0.332 ± 0.000	0.129 ± 0.000

En total se realizaron un total de 108 análisis cromatográficos de muestras de conchas de ostrácodos y gasterópodos, en los que se identificaron los aminoácidos isoleucina, leucina, fenilalanina, ácido aspártico y ácido glutámico, aunque se emplearon fundamentalmente estos dos últimos ya que fiabilidad medida análisis multivariante de los ratios D/L de los diversos aminoácidos identificados. En la tabla 1 se recoge el valor medio y desviación estándar de los ratios D/L Asp y D/L Glu de los ostrácodos del área de Priego

TABLA 1. Valor medio y desviación estándar de los ratios D/L ASP y D/L GLU de los ostrácodos del área de Priego.

Aminoestratigrafía

La aminoestratigrafía consiste en situar en orden estratigráfico localidades geológicas, paleontológicas o arqueológicas a partir de los ratios D/L obtenidos en fósiles del mismo grupo (género) que se han preservado bajo condiciones ambientales e historias térmicas similares.

Para llevar a cabo este estudio se han analizado las posibles diferentes agrupaciones de muestras de cada corte realizando un análisis análisis clúster tomando como variables los ratios D/L Asp y D/L Glu obtenidos en ostrácodos. Del dendrograma (distancia superior minimal y distancia euclídea) de la figura 5 se deduce la existencia de seis grupos (Aminozonas).

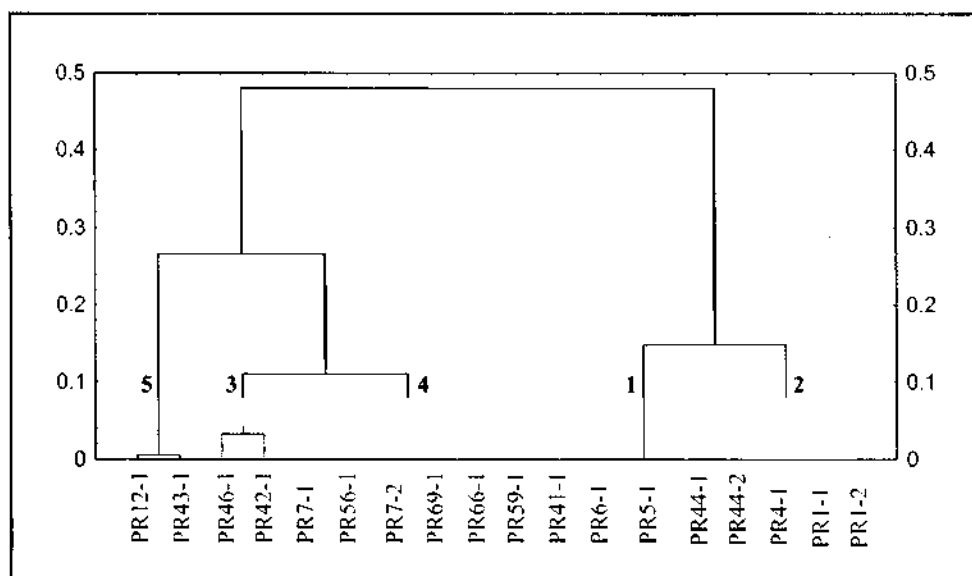


Figura 5. Dendrograma de los valores D/L Asp y D/L Glu analizados en los ostrácodos de Priego empleando la distancia euclídea y distancia superior minimal.

Cada aminozona agrupa las muestras con valores de ratios D/L similares y, por consiguiente, representa la asociación de niveles estratigráficos sincrónicos, siendo la aminozona con valores de los relaciones de racemización más altos la más antigua. Los valores medios de los ratios D/L de cada una junto con los niveles que las constituyen se encuentran en la tabla 2.

TABLA 2.

Valor medio y desviación estándar de los ratios de racemización del ácido aspártico y ácido glutámico que caracterizan a las aminozonas de ostrácodos definidas en el área de Priego y cortes que las integran.

Aminozona	Niveles	D/L Asp	D/L Glu
1	PR5	0.559 ± 0.000	0.348 ± 0.000
2	PR1, PR4, PR44	0.479 ± 0.024	0.218 ± 0.029
3	PR42, PR46	0.414 ± 0.016	0.147 ± 0.016
4	PR7, PR56	0.371 ± 0.006	0.124 ± 0.007
5	PR6, PR41, PR59, PR66, PR69	0.332 ± 0.003	0.118 ± 0.006
6	PR12, PR43	0.186 ± 0.003	0.048 ± 0.000

Aminocronología

Una vez establecida la aminoestratigrafía de las terrazas se calculó la edad numérica de cada terraza (aminocronología). Los algoritmos que se emplearon en este estudio fueron los definidos por Ortiz *et al.* (2004a) a partir de las relaciones de racemización de ostrácodos de la zona central y sur de la Península Ibérica.

Para el ácido aspártico:

$$\sqrt{t} = -2.666 + 18.027 \operatorname{Ln} \left[\frac{1 + D/L}{1 - D/L} \right]; r = 0.991, p = 0,000$$

Para el ácido glutámico:

$$t = -39.59 + 622.25 \operatorname{Ln} \left[\frac{1 + D/L}{1 - D/L} \right]; r = 0.988, p = 0,000$$

Para muestras jóvenes, con valores del ratio de racemización del ácido aspártico inferior a 0.401 y del ácido glutámico menor que 0.140 se emplearon unas ecuaciones diferentes (Ortiz *et al.*, 2003) calculadas a partir de ostrácodos de la especie *Herpetocypris reptans* (Baird) debido, fundamentalmente, a dos razones:

- 1) La racemización es un proceso que no se comporta de manera lineal debido a que la tasa o velocidad de racemización desciende con el tiempo. Hay, pues, una relación no lineal entre los ratios D/L y la edad (Goodfriend, 1991). El modelo general de racemización, expuesto anteriormente, combina al menos dos funciones con diferentes pendientes. Como consecuencia de este comportamiento, la obtención de algoritmos para distintos tramos de la función que modeliza la racemización sería el procedimiento correcto de cálculo de edades.
- 2) Dependiendo del género zoológico, la velocidad de racemización es distinta, estando las diferencias más acusadas en las muestras más modernas (en muestras más antiguas los ratios de racemización de géneros distintos son más parecidos) (Torres *et al.*, 2000). Las ecuaciones que se emplearán se calcularon a partir de ostrácodos de la misma especie que los analizados en las muestras de Priego.

Las ecuaciones que se emplearán para datar las muestras más recientes son las siguientes:

Para el ácido aspártico:

$$\sqrt{t} = -3.586 + 19.745 \operatorname{Ln} \left[\frac{1 + D/L}{1 - D/L} \right]; r = 0.993, p = 0,001$$

Para el ácido glutámico:

$$\sqrt{t} = -3.186 + 58.972 \operatorname{Ln} \left[\frac{1 + D/L}{1 - D/L} \right]; r = 0.989, p = 0,001$$

Los valores de los ratios D/L del ácido aspártico y ácido glutámico medidos en ostrácodos de la zona de Priego se introdujeron en los algoritmos de cálculo de edad. La edad de cada localidad (tabla 3) se calculó como la media de los valores obtenidos para cada valor del ratio

D/L de cada aminoácido en cada muestra de una localidad. El error de la edad para cada localidad es la desviación típica de los valores de edad calculados a partir de cada valor del ratio *D/L* obtenido en las muestras analíticas de cada corte.

TABLA 3.
Datación de las terrazas fluviales del área de Priego.

NIVEL	EDAD (miles de años)
PR5	407.566 ± 12.543
PR1	273.765 ± 9.530
PR44	260.784 ± 14.423
PR4	253.636 ± 10.188
PR46	189.890 ± 23.971
PR42	172.156 ± 6.137
PR56	138.483 ± 8.661
PR7	134.624 ± 15.480
PR69	123.229 ± 31.928
PR6	107.856 ± 8.685
PR59	106.956 ± 6.720
PR41	105.781 ± 4.480
PR66	98.654 ± 2.804
PR43	11.249 ± 6.364
PR12	10.253 ± 5.377

Además de las dataciones obtenidas en el presente Proyecto, se contó con los valores de edad de Torres *et al.* (1994, 1995) obtenidos mediante datación radiométrica (U/Th) de algunas terrazas del área de Priego (tabla 4).

TABLA 4.
Cálculo de las edades de las localidades del área de Priego mediante el método de U/Th (Torres *et al.*, 1994, 1995).

NIVEL	U (ppm)	²³²Th	²³⁴U/²³⁸U	²³⁰Th/²³⁴U	²³⁰Th/²³²Th	EDAD BP (ka)
PR5	0,41	0,06	1,06 ± 0,05	1,06 ± 0,08	23,458 ± 2,664	>350
PR6	0,45		1,51 ± 0,04	0,65 ± 0,03	-	105,132 ± 7,648
PR7	0,17		1,50 ± 0,03	0,81 ± 0,02	-	156,005 ± 7,970
PR10	0,49	0,41	1,52 ± 0,06	0,16 ± 0,01	1,418 ± 0,088	18,196 ± 1,382

AMINOZONA	EDAD (ka)
1	407 ± 12
2	263 ± 14
3	181 ± 17
4	136 ± 13
5	108 ± 14
6	11 ± 4

Comparando los valores que aparecen en las tablas 3 y 4 cabe destacar la similitud entre los datos obtenidos aplicando el método de racemización de aminoácidos y los que aparecen en Torres *et al.* (1994, 1995) con las dataciones radiométricas. También se ha calculado la edad media de cada aminozona definida a partir de los ratios *D/L* del ácido aspártico y ácido glutámico (Tabla 5).

TABLA 5.
Edad media de las aminozonas de Priego.

Se puede establecer una correlación entre las aminozonas datadas y episodios paleoclimáticos definidos en España y Europa.

La Aminozona 1 (407 ± 12 ka B.P.) se correlaciona con el inicio del 4 Período Cálido y Árido definido por Ortiz *et al.* (2006) en la mitad sur de la Península Ibérica. Equivale al interglaciar Holstein de la cronología glaciaria europea. Se corresponde también con el Episodio 11 del oxígeno (Shackleton, 1989) definido en el registro de la $\delta^{18}\text{O}$ obtenida en foraminíferos de sondeos marinos, y con el episodio Dodoni (cálido) definido a partir del estudio polínico de la serie estratigráfica de la cuenca de Ioannina (Grecia) realizado por Tzedakis (1994).

La Aminozona 2 (263 ± 14 ka B.P.) se corresponde con el Episodio 7e del oxígeno y con el evento denominado Zitsa definido en la cuenca de Ioannina (Tzedakis, 1994).

La Aminozona 3 (181 ± 17 ka B.P.) se correlaciona con el Episodio 7a del oxígeno.

La Aminozona 4 (136 ± 13 ka B.P.) se corresponde con el final del Episodio 6 del oxígeno- comienzo del Episodio 5 del oxígeno.

La Aminozona 5 (108 ± 14 ka B.P.) se correlaciona con el período climático cálido correspondiente al período interglaciar Eemiense (episodio 5 del oxígeno).

La Aminozona 6 (11 ± 4 ka B.P.) se corresponde con el final del último gran máximo glaciario de la Glaciación Würm y con el Episodio 1 del oxígeno.

Evidentemente la formación de los travertinos estuvo ligada a períodos de pluviosidad reducida en la que las aguas subterráneas se saturaron rápidamente de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y la temperatura más elevada propició el desarrollo de biomasa acuática capaz de disminuir la presión parcial del CO_2 del agua. En los períodos fríos con una mayor pluviosidad las aguas más frías propiciaron la incisión y destrucción de los edificios travertínicos.

Cálculo de las tasas de incisión

Teniendo en cuenta los resultados de la datación de las terrazas se ha estimado la tasa de erosión en cada uno de los ríos. En primer lugar, se escogió la zona de cabecera del río Trabaque.

Por otro lado, se eligió el río Escabas donde en una pequeña área se distinguen 4 niveles de terraza data-dos (PR1, PR42, PR66, PR43) (Fig. 6).

Conclusiones

Se diferencian seis niveles de terrazas en la zona de Priego. Para la formación de los depósitos travertínicos se propone (Fig 7A) un perfil en "doble-cuña" para cada evento de acumulación de travertinos fluviales. Un extremo se encuentra aguas-arriba, en la salida de un cañón, donde las características del flujo favorecen la sedimentación de extraclastos y no de travertinos. El otro extremo se encuentra aguas abajo, donde la cantidad de bicarbonato cálcico disponible es reducida y solamente se produce una sedimentación detrítica de escasa potencia. La mayor cantidad de depósitos travertínicos se produce en la zona central del modelo, donde se dan las condiciones ambientales más favorables (bicarbonato disuelto, turbulencia del agua, temperatura). Las construcciones travertínicas actuaron como trampas donde se acumula el sedimento (extraclástico e intraclástico). Reactivaciones posteriores destruyeron parcialmente facies "framestone" (plantas o sus moldes en posición de vida) produciendo bioclastos que se transportaron aguas abajo y donde se acumularon.

En el río Trabaque (Fig 7B) el modelo es algo más complicado debido a la existencia de cambios abruptos en el nivel de base del río ligados a la existencia de barreras. La destrucción de estas barreras afectará en gran medida a la altura de las nuevas terrazas que se formen. Las terrazas destruidas y nuevas se pueden considerar singenéticas de acuerdo con los ratios de racemización obtenidos en ostrácodos. Las variaciones en distancias cortas se deben a la formación de barreras.

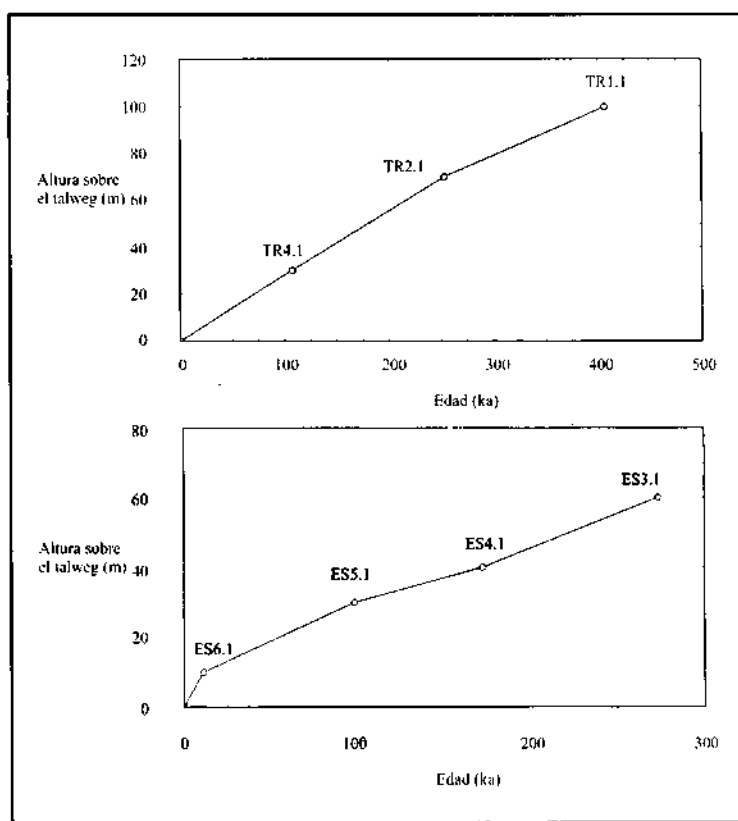


Figura 6. Tasa de erosión en el río Trabaque. B) Tasa de erosión en el río Escabas.

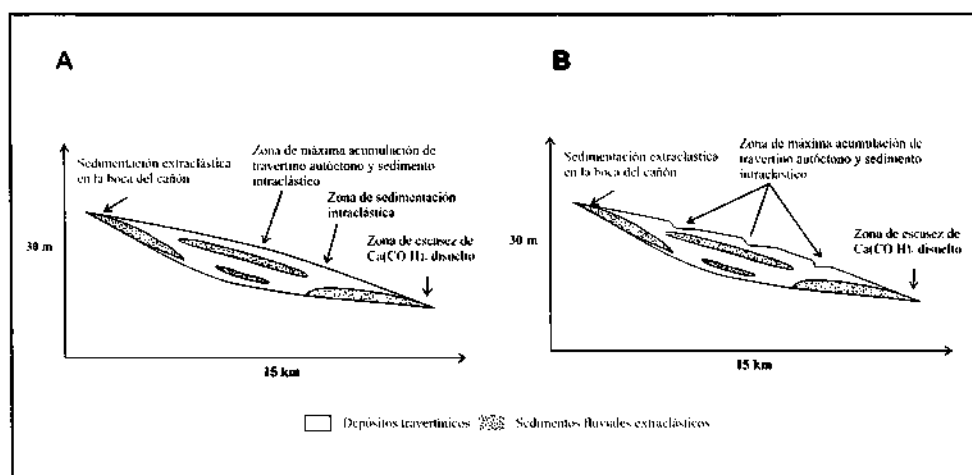


Figura 7. A) Modelo de sedimentación para cada evento de acumulación de travertinos fluviales a lo largo del perfil longitudinal de un río establecido en la zona de Priego. B) Modelo de sedimentación para cada evento de acumulación de travertinos fluviales a lo largo del perfil longitudinal del río Trabaque (Priego).

Referencias

- Goodfriend, G.A., 1991, *Patterns of racemization and epimerisation of aminoacids in land snails shells over the course of the Holocene*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55, 293-302.
- Goodfriend, G.A., 1992, *Rapid racemization of aspartic acid in mollusc shells and potential for dating over recent centuries*. *Nature* 357, 399-401.
- Goodfriend, G.A., Hare, P.E., Druffel, E.R.M., 1992, *Aspartic acid racemization and protein diagenesis in corals over the last 350 years*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56, 3847-3850.
- Goodfriend, G.A., Kashgarian, M., Harasewych M.G., 1995, *Use of aspartic acid racemization and post-bomb ^{14}C to reconstruct growth rate and longevity of the deep-water slit shell *Entemnotrochus adansonianus**. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59 (6), 1125-1129.
- Kaufman, D.S., Manley, W.F. (1998). *A new procedure for determining DL amino acid ratios in fossils using reverse phase liquid chromatography*. *Quaternary Geochronology* 17, 987-1000.
- Ortiz, J.E., Torres, T., Llamas, F.J. (2002). *Cross-calibration of the racemization rates of leucine and phenylalanine and epimerization rates of isoleucine between ostracodes and gastropods over the Pleistocene in southern Spain*. *Organic Geochemistry* 33, 691-699.
- Ortiz, J.E., Torres, T., Julià, R., Delgado, A., Llamas, F.J., Soler, V., Delgado, J. (2004). *Numerical dating algorithms of amino acid racemization ratios from continental ostracodes. Application to the Guadix-Baza Basin (southern Spain)*. *Quaternary Science Reviews* 23, 717-730.
- Ortiz, J.E., Torres, T., Delgado, A., Reyes, E., Llamas, J.F., Soler, V., Raya, J. (2006). *Pleistocene paleoenvironmental evolution at continental middle latitudes inferred from carbon and oxygen stable isotope analysis of ostracodes from the Guadix-Baza Basin (Granada, SE Spain)*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 240, 535-561.
- Othani, S., Matsushia Y., Kobayashi Y., Kishi, K. (1998). *Evaluation of aspartic acid in human femur for age estimation*. *Journal of Forensic Science* 43, 949-953.
- Shackleton, N.J. (1995). *New data on the evolution of Pliocene climatic variability*. En: Vrba, E.S., Denton, G.H., Partidge, T.C., Burckle, L.H. (Eds), *Palaeoclimate and Evolution with Emphasis on Human Origins*. Yale University Press, New Haven, CT, pp. 242-248.
- Torres T., Canoira L., Cobo R., García P., García Cortés A., Juliá R., Llamas J., Hoyos M., Meyer V. (1994). *Aminoestratigrafía y aminozonación de los travertinos fluviales de Priego (Cuenca, España Central)*. *Geogaceta* 17, 102-105.

Torres, T. Cobo, R. Canoira, L. García Cortés, A. Grün, R. Hoyos, M. Juliá, R. Llamas, J. Mansilla, H. Quintero, I. Soler V., Valle, M. Coello, F.J. García-Alonso, P. Guerrero, P. Nestares, T. Rodríguez-Alto, Baretino, D., 1995. *Reconstrucción paleoclimática desde el Pleistoceno medio a partir de análisis geocronológicos e isotópicos de travertinos españoles*. Area B: *Travertinos fluviales de Priego (Cuenca)*. Technical project (ENRESA), Madrid, 108 pp.

Torres, T., Llamas, J., Canoira, L., García-Alonso, P., García-Cortés, A., Mansilla, H., 1997. *Amino acid chronology of the Lower Pleistocene deposits of Venta Micena (Orce, Granada, Andalusia, Spain)*. *Organic Geochemistry* 26, 85-97.

Torres, T., Llamas, J., Canoira, L., Coello, F.J., García-Alonso, P., Ortiz, J.E., 2000. *Aminostratigraphy of two Pleistocene marine sequences from the Mediterranean Coast of Spain: Cabo de Huertas (Alicante) and Carrucha (Almería)*. In: Goodfriend, G.A., Collins, M.J., Fogel, M.L., Macko, S.A., Wehmler, J.F. (Eds.), *Perspectives in Amino Acids and Protein Geochemistry*. Oxford University Press, New York. pp. 263-278.

Torres, T., Ortiz, J.E., García de la Morena M.A., Llamas F.J., Goodfriend G. (2005). *Aminostratigraphy and aminochronology of a tufa system in Central Spain*. *Quaternary International* 135, 21-33.

Tzedakis, P.C. (1994). *Vegetation change through glacial-interglacial cycles: a long pollen sequence perspective*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 345, 403-432.