# Geoformas cordadas en arenisca del flysch costero Eoceno, Gipuzkoa

Chordate geoforms in sandstone of the coastal Eocene flysch, Gipuzkoa



Carlos Galán; José Rivas & Marian Nieto. Sociedad de Ciencias Aranzadi. Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain. E-mail: cegalham@yahoo.es (Mayo 2008)

## GEOFORMAS CORDADAS EN ARENISCA DEL FLYSCH COSTERO EOCENO, GIPUZKOA

CHORDATE GEOFORMS IN SANDSTONE OF THE COASTAL EOCENE FLYSCH, GIPUZKOA

### Carlos GALAN; José RIVAS & Marian NIETO.

Sociedad de Ciencias Aranzadi. Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain. E-mail: cegalham@yahoo.es (Mayo 2008)

#### RESUMEN

Se presenta una descripción de formas pseudokársticas de facies cordada, desarrolladas en arenisca de edad Eoceno, localizadas en el litoral de Gipuzkoa (País Vasco). Dichas geoformas presentan el aspecto de cuerdas entrelazadas, de variable diámetro; las más finas forman delicados encajes y pueden cubrir superficies de varios metros cuadrados. Se localizan tanto en el interior de cavidades y abrigos como sobre superficies de paredes y bloques expuestos a la intemperie. Estas remarcables geoformas son originales y típicas de esta litología. Se discute su origen y evolución.

Palabras clave: Espeleología, pseudokarst, arenisca, geomorfología, cuevas y formas de superficie.

#### **ABSTRACT**

We present a description of pseudokarst forms of chordate facies, developed in sandstone of Eocene age, located in the littoral of Gipuzkoa (Basque Country). The geoforms resembling interweaved ropes of variable diameters, the finest ones form delicate frames on surfaces of several meters quadrates. These are located in the inner ceiling and walls of caves and on shelters as well as on surfaces of walls and blocks exposed outdoors. These remarkable geoforms are original and typical of this lithology. We discuss its origin and evolution.

Key words: Speleology, pseudokarst, sandstone, geomorphology, caves and superficial forms.

## INTRODUCCION

En la costa de Gipuzkoa, entre Hondarribia, San Sebastián y Orio, aflora una serie flysch compuesta básicamente de areniscas. El tramo superior Eoceno de este flysch costero ha sido denominado Formación Jaizkibel (CAMPOS, 1979). El término "flysch" define una alternancia de estratos duros (de caliza o arenisca) con otros blandos (de lutitas y margas), formados en ambientes turbidíticos. El tramo superior Eoceno está formado por capas duras de arenisca, de cemento carbonático, con intercalaciones de niveles delgados de lutitas. En este trabajo nos referiremos a los afloramientos de areniscas Eocenas existentes en dicho tramo del litoral, el cual comprende los montes Jaizkibel, Ulía e Igueldo.

En estos relieves se detectó la presencia de formas pseudokársticas, incluyendo sistemas de pequeñas cuevas, abrigos y mesocavernas, con una gran variedad de notables geoformas y una peculiar fauna. Una amplia descripción fue presentada en dos trabajos anteriores (GALAN et al., 2007a, 2007b); en ellos fueron expuestos los datos más representativos y se discutieron los probables factores y procesos que intervienen en su génesis. Cabe destacar que el pseudokarst en arenisca que aquí tratamos posee similitudes con el karst en cuarcita de otros países (como Venezuela, Brasil o Sudáfrica), pero además presenta un singular conjunto de rasgos propios, algunos de ellos probablemente constituyendo los mejores ejemplos en su tipo conocidos a nivel mundial. Entre ellos son frecuentes y notables las geoformas con facies de panal de abejas (honeycomb cells), hojaldres gigantes (boxworks), coraloides (coral-like forms) y tramas cordadas (chordate geoforms). En la presente nota se describen las geoformas cordadas.

Además del interés científico que posee el pseudokarst en arenisca, sus rasgos son estéticamente remarcables. El abrupto relieve del litoral donde se encuentran las geoformas ha hecho que permanezcan ignoradas. Pero somos de la opinión de que alberga algunos de los más bellos ejemplos de interés geológico del País Vasco. Ya que las imágenes dicen más que mil palabras, ilustramos su descripción con diversas fotografías. El lector podrá juzgar lo acertado o no de nuestras apreciaciones.

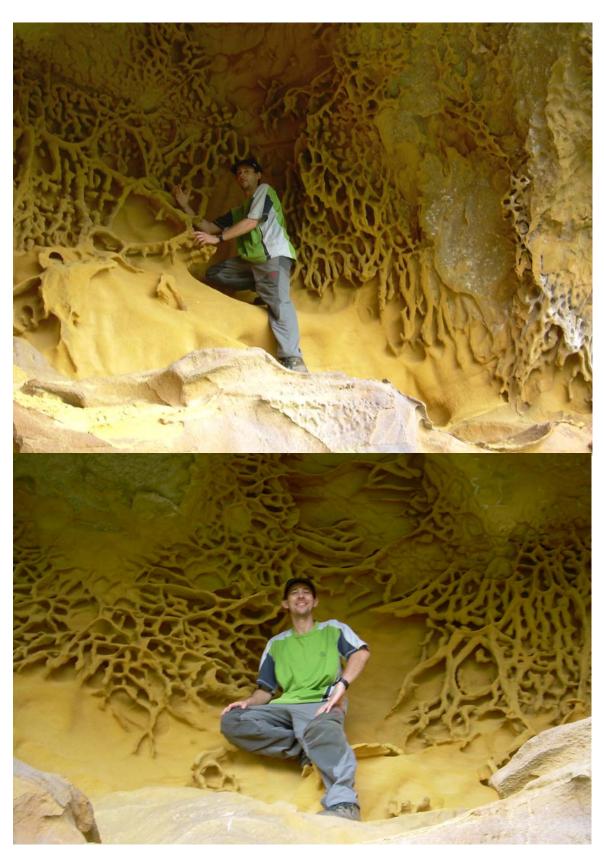
## **CONSIDERACIONES GEOLOGICAS**

Litológicamente las areniscas de la Formación Jaizkibel son areniscas cuarzosas de cemento carbonático y de colores claros (blancas, amarillas, ocres y rosadas). Están formadas por un entramado de granos de cuarzo bien redondeados, que pueden constituir hasta el 90% de la roca (siempre más del 80%), y cantidades menores de feldespatos y micas. El tamaño

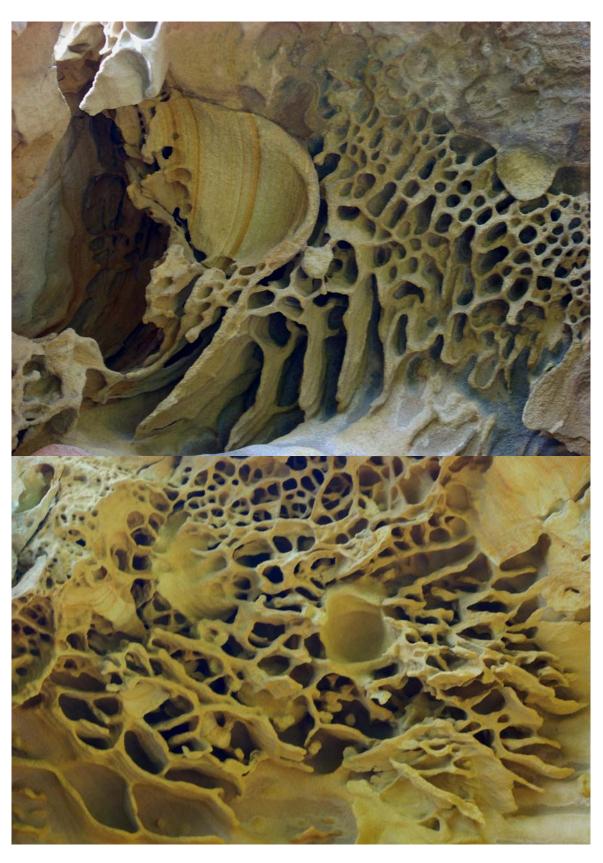




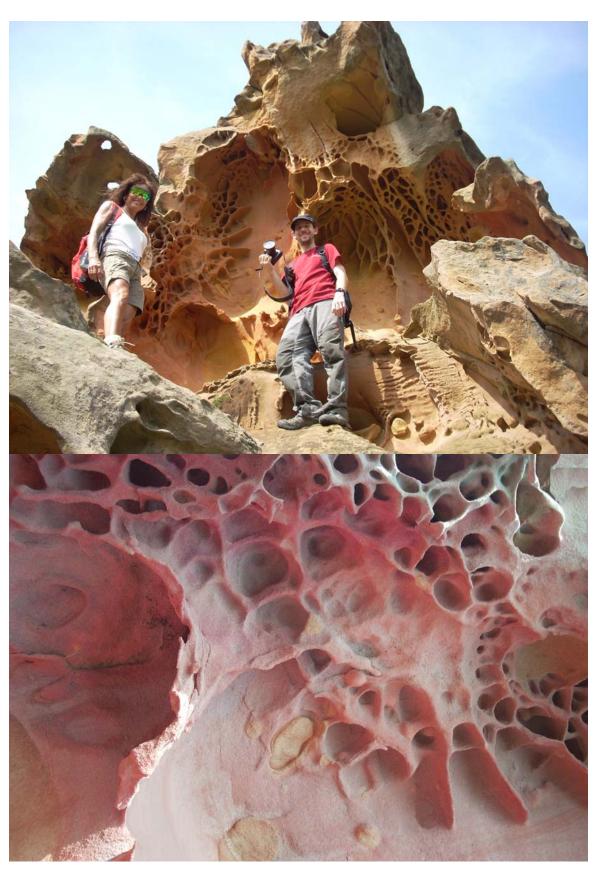
Las geoformas cordadas se presentan en el interior de abrigos, grutas y cuevas, excavadas en escarpes verticales. Estos constituyen relieves prominentes, situados a altitudes variables, de entre 0 y 400 m snm.



Las geoformas cordadas forman una trama o malla con aspecto de cuerdas entrelazadas. Dicha trama está casi completamente separada de la pared (o de la bóveda) y cubre superficies amplias, de varios metros cuadrados.



Las geoformas cordadas pueden mostrar gradación con formas coraloides y boxworks. También pueden intersectar nódulos, discos y otras estructuras de corriente.



Geoformas cordadas gradando a boxworks, bajo bóvedas y paredes de amplios abrigos, distribuidos a diversas alturas, en escarpes verticales prominentes. Los abrigos se localizan en los distintos estratos de arenisca, de coloración variable.

medio de grano se hace mayor hacia la parte alta de la serie. Los estratos individuales de arenisca, de 2 á 8 m de potencia, presentan mayoritariamente laminación paralela y laminación disturbada (= convoluted beds); también se observan estructuras formadas durante la compactación (discos y pilares) y diversas estructuras de corriente, siendo frecuentes los nódulos esféricos de arenisca más dura, de variable diámetro.

El flysch de arenisca ha sido interpretado como un depósito de sistemas turbidíticos (MUTTI, 1985; ROSELL et al., 1985; ROSELL, 1988), definido por la erosión y resedimentación parcial o total de una plataforma. Las estructuras de corriente son muy frecuentes en la base de los estratos y regionalmente muestran un patrón en abanico. La Formación Jaizkibel se originó por acumulación de material detrítico en la desembocadura de un profundo cañón submarino (KRUIT et al., 1972). El hecho de que la granulometría de la arenisca sea más grosera hacia la parte alta de la secuencia, a la vez que aumenta progresivamente el espesor de los bancos, indica que se trata de la parte media de conos de deyección submarinos; los fósiles hallados, claramente rodados, llevan a concluir que la acumulación se debió verificar a una profundidad variable entre 1.000 y 4.000 m, habiéndose depositado los materiales arenosos por corrientes de gravedad (CAMPOS, 1979). Para VAN VLIET (1982) y ROSELL et al. (1985) la cuenca eocénica corresponde a un surco alineado de E a W, donde las facies distales (profundas) se sitúan en la parte occidental (País Vasco). Se desconoce donde se hallaban situadas las plataformas deltaicas, cuya destrucción y resedimentación originaría las turbiditas eocénicas del Arco Vasco. Por tratarse del sector de cuenca más abierto al océano, es probable que estas plataformas se hayan destruido por completo, lo cual al mismo tiempo explica el considerable desarrollo de sus sistemas turbidíticos (ROSELL, 1988).

La estructura es monoclinal y con buzamiento N. Debido a la plasticidad del flysch las rocas han sido plegadas desigual y enérgicamente. En algunos acantilados el buzamiento es alto, pero en amplias secciones de Jaizkibel e Igueldo el buzamiento es menor, generalmente comprendido entre 20° y 40° N. En estas zonas de menor buzamiento (que en la topografía de superficie forman cuestas, con lajas de roca plana que llegan hasta el mar) es donde se encuentran los mejores ejemplos de pseudokarst, particularmente en Jaizkibel.

#### **GEOFORMAS CORDADAS**

Las geoformas que describiremos a continuación están compuestas enteramente de arenisca, por lo que no se trata de espeleotemas o minerales secundarios, sino de formas esculpidas por meteorización química en la roca-caja, la cual ha experimentado una disolución intergranular de su matriz carbonática y una recementación parcial de los granos de cuarzo.

En la secuencia de areniscas son comunes abrigos y cuevas con numerosas concavidades, formas alveolares, formas coraloides y celdas tipo "panal de abejas"; estas recuerdan a los "tafoni" que presentan las areniscas y otras rocas en zonas áridas o desérticas (BIROT, 1981; MAINGUET, 1972; MARTINI, 1978; MUSTOE, 1982; TWIDALE, 1982). Pero además se encuentran celdas en panal de abejas de tamaños considerablemente grandes y gigantescos hojaldres (= boxworks), formados por delgados tabiques o quillas que separan celdas profundas y amplias (GALAN et al., 2007a). Su diversidad es enorme, ya que a veces están asociadas a discos y otras estructuras de corriente.

Un caso singular y extremo lo constituyen las formas cordadas. Estas constituyen una trama de delicados cortinajes con aspecto de cuerdas o cordones entrelazados. Generalmente cubren áreas amplias, de varios metros cuadrados de superficie. Dicha trama está casi totalmente separada de la pared (o de la bóveda), y sólo la unen a ella delgados puentes de roca. Predominan las formas en roca "arenizada", la cual ha perdido parte de la matriz o cemento carbonático, siendo friable (los granos de cuarzo están casi sueltos y resultan fáciles de desprender por fricción). Pero simultáneamente las geoformas presentan cierto grado de cohesión y coherencia (al menos similar a la de la pared que cubren). En ocasiones las tramas cordadas son muy sólidas y están fuertemente recementadas, existiendo una gran diversidad de situaciones. Igualmente variables son sus localizaciones, que expondremos a continuación.

## **LOCALIZACION DE LAS GEOFORMAS**

Mayoritariamente las geoformas cordadas se presentan en el interior de abrigos, grutas y cuevas, excavadas en escarpes verticales de relieves prominentes (a altitudes de entre 0 y 400 m snm), los cuales coronan los abruptos flancos de pequeños valles longitudinales que siguen el buzamiento de las capas hacia el mar. También se presentan en cavidades localizadas a diferentes niveles sobre acantilados próximos al mar.

Minoritariamente pueden presentarse también sobre grandes bloques de desprendimiento o colapso (producto del desmantelamiento de los estratos superiores), los cuales yacen en diferentes posiciones fisiográficas (al pie de acantilados, escarpes, en cañones y en zonas desmanteladas). Los bloques, de varios metros cúbicos de volumen, suelen presentar en su perímetro inferior externo numerosas oquedades, que pueden llegar a vaciar casi por completo el bloque y que albergan muy diversas geoformas alveolares.

En abrigos y pequeñas cuevas las formas cordadas recubren parte de su interior, ocupando generalmente las paredes más profundas y las bóvedas. A veces están separadas de otras formas, sobre roca lisa, pero es común una gradación entre



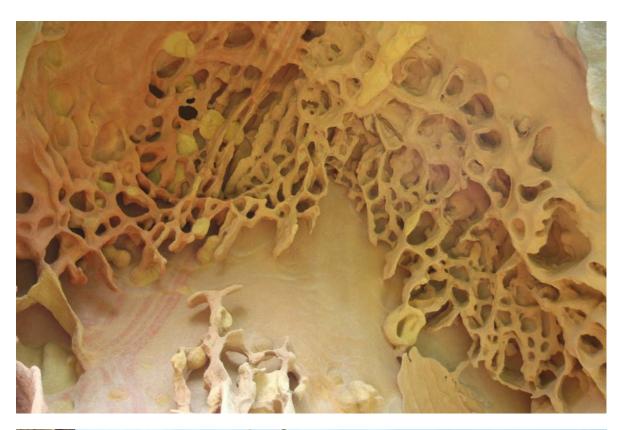


Diversidad de geoformas en una cavidad colgada. Se aprecian grandes boxworks en la parte derecha de la foto superior e incipientes formas cordadas en la parte central y en la fotografía inferior.



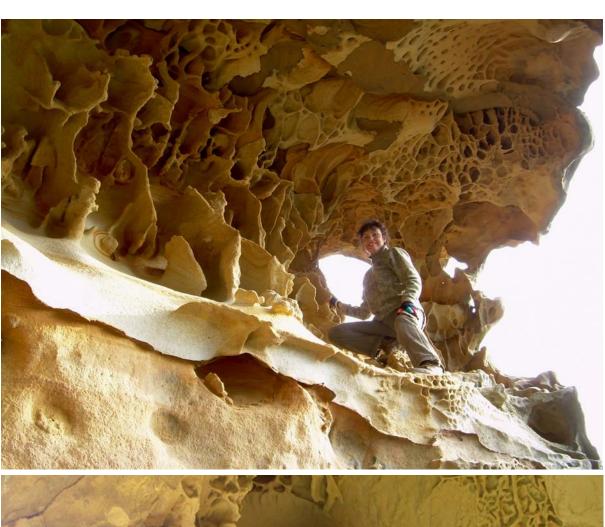


Detalle de geoformas cordadas. Los tabiques laminares sugieren su formación por perforación de los mismos a partir de boxworks. Nótese el llamativo diseño producido al intersectar las geoformas la estructura primaria de la roca.





Trama de formas cordadas sobre las paredes internas y bóvedas de abrigos colgados en escarpes.





Grandes boxworks y geoformas cordadas en el interior de cavidades. En la foto inferior puede apreciase la arenización de las geoformas en la pared izquierda, mientras que la malla cordada de la pared derecha es mucho más consistente.

boxworks y formas cordadas. Ello sugiere que las formas cordadas han evolucionado por coalescencia de celdas a partir de boxworks: las quillas o costillas entre celdas van siendo perforadas a nivel de la pared, los agujeros entre celdas se agrandan, y acaban por dejar una trama o malla con aspecto de cuerdas entrelazadas.

En las zonas subyacentes se aprecian finos dibujos, debidos a la laminación y a la forma ondulada de las estructuras de corriente que contiene la roca, con líneas de distinto colorido. Los dibujos son muy diversos y de gran belleza estética, ya que las geoformas intersectan la estructura primaria de las areniscas, en la cual existen también vetas y laminaciones, con silicificaciones locales y mayor contenido en hierro, según muestran los análisis hechos (GALAN et al., 2007b).

En las cuevas y abrigos se encuentran geoformas tanto frágiles y disgregables, como otras compactas, cementadas y resistentes. La mayoría de las cavidades no está orientada hacia el cuadrante NW, de donde proceden los vientos dominantes, sino por el contrario en las orientaciones más protegidas de la acción del viento, S y E. Por lo cual, aunque el viento puede intervenir en la remoción de granos, el agua de percolación intergranular y la humedad atmosférica deben ser los principales agentes de meteorización y alteración de la roca compacta. El interior de los abrigos es seco (o poco húmedo), por lo que la acción de películas o láminas de agua no parece comandar la alteración superficial y la excavación de formas.

En los casos de bloques y paredes expuestas a la intemperie, la trama de formas cordadas es muy fina, está fuertemente recementada y cubre las superficies externas con delicados encajes, de pequeño tamaño de celda.

Los fenómenos descritos se desarrollan en los bancos más compactos de arenisca de la Formación Jaizkibel, donde los niveles de lutitas faltan o son muy delgados, reposando prácticamente unos estratos sobre otros.

Cabe también destacar que el clima de la región es húmedo, de tipo atlántico. Las lluvias están bien repartidas a lo largo del ciclo anual y alcanzan valores de 1.700 - 1.800 mm/a. Los vientos predominantes del cuadrante NW aportan aire húmedo, siendo zonas brumosas, con lluvias y lloviznas frecuentes.

### **ORIGEN DE LAS GEOFORMAS**

Las geoformas cordadas se originan por meteorización química, la cual comprende procesos de disolución intergranular y alteración de los minerales de la roca caja. Estos procesos actúan mayoritariamente sobre la matriz o cemento carbonático y en menor proporción sobre los granos silíceos. Así es perdida la mayor parte del cemento y descohesionada la roca.

Adicionalmente, aunque la mayor parte de los minerales disueltos son evacuados, cierto porcentaje de la matriz puede quedar sin disolver, a la vez que pueden movilizarse y depositarse minerales que contribuyen a la cementación.

La disolución procede químicamente por la acción disolvente de agua intergranular (cargada de CO<sub>2</sub> y ácidos del suelo) sobre la matriz carbonática. Pero además de actuar a través o a partir de discontinuidades de la roca (diaclasas y planos de estratificación), progresa intergranularmente. De este modo es disuelto el cemento. También puede ser disuelto cierto porcentaje de sílice. Aunque la tasa de solubilidad de la sílice es muy baja, lo interesante (como ha sido demostrado para el karst en cuarcita) es que su tasa de disolución es muy baja (GALAN, 1991; GALAN & LAGARDE, 1988; URBANI, 1981, 1986). Cuando el agua circula intergranularmente esta circulación es muy lenta debido a su viscosidad, y el agua puede permanecer subsaturada con respecto a la sustancia sobre cierta distancia sólo si la tasa de disolución es baja. Este es el caso para el cuarzo, pero no para la calcita. De este modo el cuarzo puede ser disuelto y evacuado en cierto porcentaje.

La disolución del cemento carbonático es probada porque el residuo que queda en el suelo de los abrigos es de arena fina. La disolución parcial de la sílice es probada porque también ocurre la reacción inversa de precipitación de sílice secundaria y porque los granos la arena residual son de menor diámetro que el grano medio a grueso de la roca de la cual proceden (aspecto apreciable al tacto e incluso a simple vista). No obstante, el volumen de material removido por disolución afecta a un porcentaje de roca mucho menor que en el karst en caliza, del orden del 10 al 20% del volumen total.

Los feldespatos y micas, incluidos en la matriz de la arenisca en cantidades minoritarias, están expuestos a una alteración relativamente rápida, produciendo carbonatos y silicatos alumínicos hidratados, los cuales son removidos con facilidad. Aunque se trata de un pequeño porcentaje, en relación al volumen de granos de cuarzo, la alteración de otros minerales contribuye también a la meteorización de la roca.

El análisis de algunas muestras por vía húmeda ha mostrado que las geoformas (en comparación con la roca caja) poseen un contenido en cuarzo menor y una alta cantidad de hierro y aluminio (GALAN et al., 2007b). Además del cemento carbonático disuelto, los feldespatos y micas son alterados, parte de la sílice es disuelta y evacuada, e incluso se produce la disolución y removilización de minerales de hierro, los cuales pueden contribuir a recementar la roca arenizada.

Podemos concluir, de modo comparado, que la disolución intergranular de la arenisca disuelve la mayor parte del cemento carbonático, parte de la sílice de los granos de cuarzo, y casi totalmente los feldespatos y micas contenidos en la arenisca en cantidades minoritarias.

Un modelo teórico general fue propuesto para explicar tanto la formación de cavidades en la arenisca como de geoformas en su interior (GALAN et al., 2007a, 2007b). Este modelo postula que la formación de cavidades y geoformas es un proceso de alteración diferencial, debido a la alternancia de fases de humectación con otras de desecación. La alteración procede por disolución intergranular: durante las fases húmedas o lluviosas el agua penetra cierta distancia a través de la porosidad de la roca y disuelve a su paso parte de la matriz carbonática; durante las fases secas, el agua se evapora de la roca, y parte del



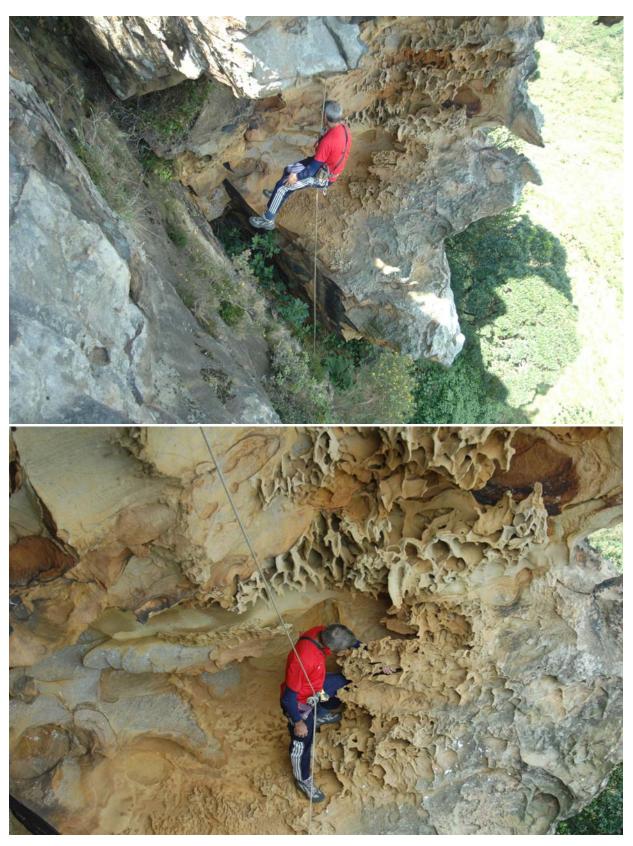


Algunas cavidades con geoformas se sitúan sobre cornisas que presentan ciertas dificultades de acceso.





Para alcanzar algunas cavidades no queda otra solución que escalar o descolgarse en rappel a pleno vacío. Pero estos aéreos enclaves presentan infinidad de geoformas notables, por lo que el esfuerzo vale la pena.



El acceso a algunos enclaves, situados bajo paredes extraplomadas, requiere efectuar maniobras de péndulo para alcanzar la pared de roca al nivel donde se encuentran las cavidades.



Secuencia de descenso hacia un abrigo que alberga geoformas cordadas y coraloides. Detalle de algunas de ellas en la fotografía inferior.



carbonato disuelto es conducido hacia la superficie, donde forma una dura zona externa. El proceso de evaporación causa que el carbonato remanente en el interior de la roca se distribuya desigualmente, dando lugar a áreas blandas y duras, con bajo y alto contenido en carbonato, respectivamente. Al progresar la meteorización, las partes suaves del interior de la arenisca se erosionarán más fácilmente que las duras, generando cavidades y geoformas. Las delicadas estructuras de las geoformas, con intrincados patrones laberínticos de aristas y celdas, resultan de las diferentes tasas de erosión de las áreas duras y blandas en el interior de la arenisca. Cabe añadir, como ha sido dicho, que la sílice y el hierro secundarios pueden contribuir a la cementación de las geoformas.

#### **EVOLUCION DE LAS GEOFORMAS**

Nuestras observaciones de campo sugieren que la penetración y circulación intergranular del agua es condicionada por la porosidad de la roca, debida a la estructura primaria de las areniscas. En las fases iniciales debe ser muy lenta y debe actuar sólo a débil profundidad con respecto a la superficie. El incremento de la porosidad efectiva debe ser más rápido en las zonas de evacuación o emergencia de las soluciones intergranulares.

En las lentas fases iniciales, al igual que ocurre en el karst en cuarcita (de cemento silíceo), debido a su viscosidad el agua puede permanecer subsaturada en cuarzo debido a que su tasa de disolución es baja. Por ello, en fases tempranas del proceso y en las zonas internas de la roca donde las circulaciones sean más lentas, la sílice de los granos de cuarzo pueda ser disuelta en pequeñas cantidades. Igualmente es probable que se produzca la alteración de los feldespatos y micas contenidos en la matriz. La presencia de diversas vetas sugiere también la disolución y removilización de hierro, el cual puede contribuir a la cementación. Obviamente, los carbonatos pueden ser disueltos por el agua cargada de CO<sub>2</sub> con gran facilidad. Las reacciones ocurrirán en función del tiempo de residencia del agua en el acuífero intergranular, y progresarán con mayor facilidad al aumentar las áreas disueltas y, por consiguiente, la porosidad efectiva.

Los pequeños alveolos tipo tafoni pueden formarse por remoción simple del cemento carbonático. Pero creemos que las grandes formas alveolares y coraloides, los hojaldres tipo boxworks y las geoformas cordadas, deben estar también soportados por silicificaciones locales, ya que de otro modo sería difícil de comprender su cohesión y consistencia con tan débil espesor de las mallas entre celdas.

En la hipótesis expuesta, la formación de áreas duras y blandas, y la formación de mallas y láminas resistentes, puede deberse así a la existencia de silicificaciones y enriquecimientos en hierro a lo largo de fracturas, las cuales endurecen esa parte de la roca, haciéndola más resistente a la arenización posterior. De modo similar, la disolución del carbonato, durante las fases de desecación, permitirá la retracción y formación de mallas de material recementado o no-disuelto; estas mallas serán la base para que progrese la creación de tabiques entre celdas. Probablemente no haya un modelo simple que explique la diversidad de formas y no son conocidos los equilibrios geoquímicos y dinámicos que intervienen en la desagregación diferencial de la roca.

Como ha sido dicho, las formas cordadas parecen evolucionar a partir de boxworks, por progresiva perforación y remoción de la zona basal de los tabiques entre celdas. En la medida en que quedan menos columnas o puntos de unión entre las geoformas y la pared subyacente, la disolución intergranular se ralentiza en las geoformas, pero prosigue en las paredes. De este modo pueden evolucionar amplias áreas hasta quedar prácticamente separadas de la pared. Es probable también que la desecación en superficie contribuya a recementar y otorgar cohesión a la malla de formas cordadas. En todo caso estas evolucionan hasta ejemplos que generan una auténtica y compleja red de cordones entrelazados, prácticamente separada y superpuesta a la pared o bóveda subyacente.

En la diversidad de formas pueden intervenir muchos otros factores, como características litológicas y texturales de la arenisca adquiridas durante su diagénesis, diversas situaciones de equilibrio geoquímico y dinámico atribuibles a la peculiar configuración del acuífero intergranular, a su geometría y funcionamiento hídrico, o a factores microclimáticos locales.

No obstante, los grandes boxworks y geoformas cordadas presentes en la arenisca de la Formación Jaizkibel, se apartan considerablemente de los modelos propuestos a nivel mundial para explicar la formación de otras geoformas tipo tafoni.

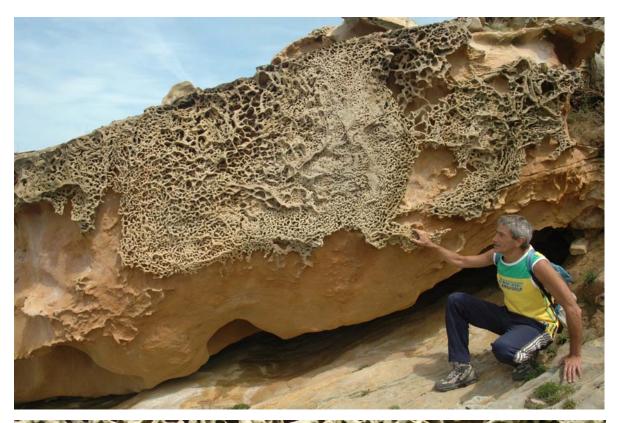
La comparación entre las diversas formas encontradas en campo permite postular una evolución en varias fases. En los puntos de evacuación del agua intergranular, ocurre primero una fase de crecimiento de geoformas. Esta da lugar a que las formas evolucionen por coalescencia hasta formar boxworks. En la siguiente fase los tabiques son perforados y agrandados generando formas cordadas. Estas progresan hasta quedar casi completamente separadas de las paredes y bóvedas, a la vez que se paraliza o ralentiza la desagregación intergranular, por alteración de las condiciones microambientales. En la última fase se produce su destrucción, por una lenta meteorización superficial, quedando sólo vestigios de la base de las geoformas. Esto prepara la pared para iniciar un nuevo ciclo, con una nueva fase de rebajamiento de la parte externa de la roca caja y una subsiguiente creación de geoformas.

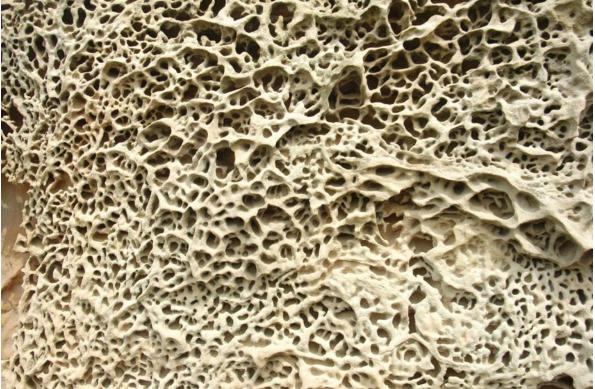
La excavación de cavidades y geoformas en la arenisca puede avanzar en los escarpes, provocando un progresivo retroceso de las paredes, desmantelamiento y rebajamiento del relieve, aunque sin formar un karst desarrollado.





Otros ejemplos de desarrollo de formas cordadas a partir de boxworks. Nótese la separación entre las geoformas y la pared subyacente y la forma laminar de algunos tabiques.





Formas cordadas sobre las paredes laterales de un bloque. Nótese la intrincada malla de pequeño tamaño de celda.



Geoformas cordadas sobre bloque. La malla cordada está más fuertemente cementada y posee mayor cohesión que la pared de roca arenizada subyacente.





Detalle de las dos láminas anteriores, en las que puede apreciarse claramente la separación entre la malla cordada y la roca arenizada subyacente. En el ángulo inferior derecho de la foto superior se observa uno de los escasos puentes de unión entre la malla cordada y la roca.

#### **DISCUSION Y CONCLUSIONES.**

A diferencia de otros modelos propuestos para explicar la creación de geoformas en la arenisca, nuestros datos sugieren que el factor fundamental es la disolución intergranular. Al actuar preferentemente sobre la matriz carbonática produce una desagregación diferencial o arenización, que torna la roca compacta en friable y permite la génesis de cavidades y geoformas.

El agua de las soluciones puede proceder de la infiltración de aguas de lluvia, de agua retenida en los suelos y del aporte de masas de aire húmedo. Procesos de haloclastia y acción eólica, frecuentemente esgrimidos como importantes factores en la formación de tafonis, no parecen ocurrir en este caso, o al menos no existe evidencia de ello. La disolución intergranular, además de afectar al cemento carbonático, disuelve parte de la sílice de los granos de cuarzo y altera cantidades minoritarias de feldespato y micas, con la ocurrencia de reacciones geoquímicas complejas. Haría falta una detallada investigación para comprender los equilibrios químicos y dinámicos del proceso, y también la diversidad de geoformas. En esta nota simplemente describimos las formas cordadas, indicando su probable génesis y evolución a partir de los datos hasta ahora disponibles.

Otro aspecto a considerar es que la disolución y meteorización de la roca también actúa en superficie. Para que se formen cavidades y geoformas es necesario que en el interior de la roca la arenización progrese más rápidamente que en superficie. De otro modo la roca sería rebajada y reducida a arena, sin formar cavidades. Las observaciones de campo muestran que la localización de cavidades ocurre en general en las partes laterales externas e inferiores de los estratos individuales y de grandes bloques desprendidos, es decir, en los puntos naturales de más fácil salida del agua intergranular.

Estas zonas, de surgencia a pequeña escala, permiten evacuar los minerales disueltos, aumentan la red de vacíos en el volumen de roca, y evolucionan hasta formas cavidades y geoformas en su interior. Debido a que las zonas arenizadas son progresivamente removidas, la ampliación de las cavidades progresa. Pero obsérvese que, con el paso del tiempo, zonas que hoy son resistentes pueden ser también arenizadas subsecuentemente.

La infiltración y el drenaje subterráneo ocurren hasta corta distancia con respecto a la superficie. La existencia de diaclasas y planos de estratificación, y la creación de fracturas por descompresión en zonas de borde, facilitan la infiltración de agua en el interior de la roca. A partir de estas vías el agua penetra intergranularmente, produciendo la disolución y arenización de la roca. En las zonas de borde, con mayor densidad de fracturas, el proceso puede extenderse hacia abajo y lateralmente hasta intersectar un vacío externo, a una cota inferior. De este modo, al establecerse un sistema subterráneo de drenaje del agua intergranular, los minerales disueltos pueden ser evacuados, ampliando progresivamente la red de vacíos y descohesionando la roca antes compacta, hasta dejar los granos de cuarzo casi sueltos. Este parece ser el proceso primario. En el crecimiento volumétrico posterior de las cavidades pueden influir muchos otros factores (anisotropía de la roca, diferencias litológicas y texturales, alternancia de fases de humectación y desecación, etc.). Pero el proceso básico es el mismo y controla las diversas formas generadas, desde formas alveolares hasta grandes boxworks, formas cordadas, abrigos y cuevas.

La arenisca del flysch costero Eoceno presenta un singular conjunto de rasgos propios, comprendiendo geoformas originales y típicas de esta litología. Los procesos que intervienen en su génesis (disolución intergranular y arenización de la roca) son ampliamente equivalentes a aquellos involucrados en la formación del karst en cuarcita (URBANI, 1986; GALAN, 1991; GALAN & HERRERA, 2006). Su resultado es una gran diversidad de cavidades y geoformas, algunas de ellas -como las geoformas cordadas aquí descritas- probablemente constituyen los mejores ejemplos en su tipo conocidos a nivel mundial.

### **AGRADECIMIENTOS**

A Iñigo Herraiz y Hugo Pérez Leunza, por su ayuda en los trabajos de campo; a Carlos Oyarzabal, por similares razones y por su ayuda en los análisis de muestras; a Daniel Adrián Decon, por las múltiples salidas compartidas al litoral guipuzcoano y por habernos indicado el interés de varios enclaves prospectados durante el presente trabajo; por último, a Franco Urbani, por sus siempre útiles informaciones, recomendaciones y comentarios.

### **BIBLIOGRAFIA**

BIROT, P. 1981. Les processus de érosion a la surface des continents. Masson. Paris.

CAMPOS, J. 1979. Estudio geológico del Pirineo vasco al W del río Bidasoa. Munibe, S.C.Aranzadi, 31(1-2): 3-139.

GALAN, C. 1991. Disolución y génesis del karst en rocas silíceas y rocas carbonáticas: un estudio comparado. Munibe (Ciencias Naturales), Soc. Cienc. Aranzadi, 43: 43-72.

GALAN, C. & J. LAGARDE. 1988. Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les quarzites du Roraima. Kartologia, 11-12: 49-60.

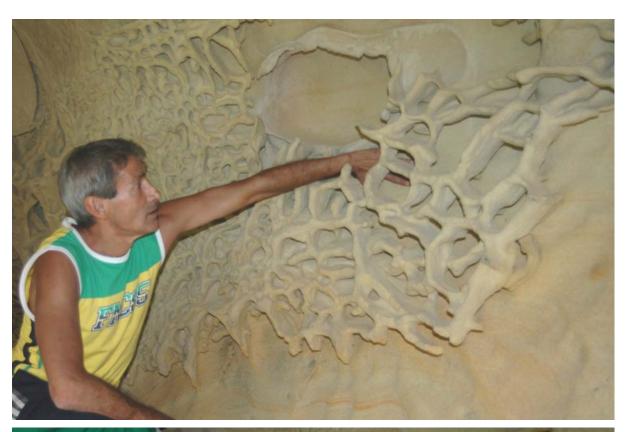
GALAN, C. & F. HERRERA. 2006. El sistema Roraima Sur, Venezuela, y la formación del karst en cuarcitas. Bol. SEDECK, 6: 18-27.

GALAN, C.; J. RIVAS & M. NIETO. 2007a. Pseudokarst dans les grès du flysch littoral Éocène, Gipuzkoa, Pays Basque Espagnol. Spelunca, FFS, 109: 12 pp (en prensa). + Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 44 pp.



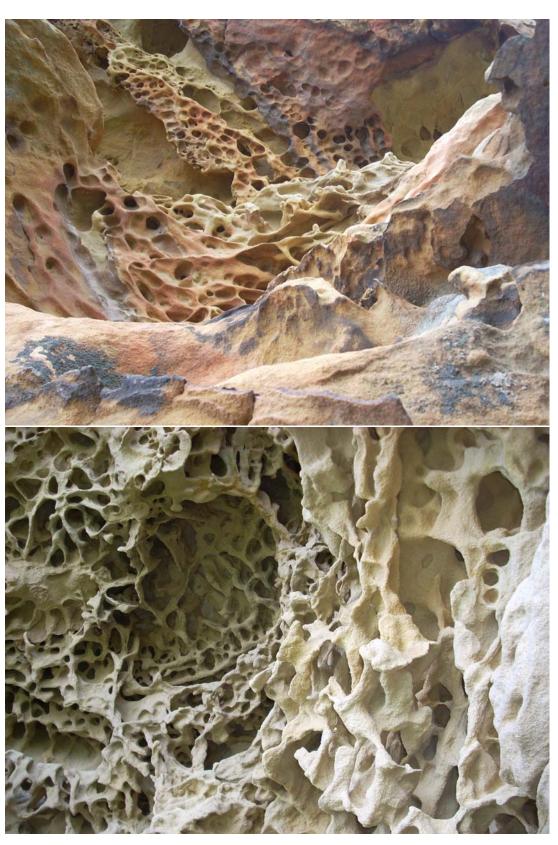


Detalle de otros bloques con mallas de formas cordadas. En los de la foto inferior, en proceso de destrucción, la meteorización ha progresado en el volumen rocoso, dejando sólo retazos de malla. Los bloques forman pequeñas cuevas de recubrimiento basales, con diversas concavidades, tubos y puentes de roca.





Detalle de geoformas cordadas en el interior de una cueva, en las cuales se aprecia perfectamente la evolución de la malla hasta su separación de la pared en proceso de arenización.



Gradaciones entre formas cordadas y boxworks. Nótese los diversos grados de separación entre la malla y la pared y los tonos rojizos que sugieren la presencia de minerales de hierro cementando la matriz.



El progresivo avance de la meteorización destruye la malla de geoformas y deja expuesta la roca arenizada subyacente, con testigos dispersos formando llamativos y extravagantes diseños.



Incipiente formación de mallas cordadas a partir de formas alveolares (imagen superior). Su destrucción, por avance de la meteorización, deja diseños de curioso aspecto (imagen inferior) y prepara la pared para un nuevo ciclo de formación de geoformas. Las imágenes tienen 5 m de ancho, en ambos casos.

- GALAN, C.; J. RIVAS & M. NIETO. 2007b. Notas suplementarias sobre formas pseudokársticas en arenisca del flysch Eoceno, Gipuzkoa. Lapiaz, nº 32: 20 pp (en prensa). + Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 20 pp.
- KRUIT, C.; BROUWER, J. & P. EALEY. 1972. A Deep-Water Sand Fan in the Eocene Bay of Biscay. Nature Physical Science, 240: 59-61.
- MAINGUET, M. 1972. Le modelé des gres. Problémes généraux. I. Geographique National. Paris.
- MARTINI, I. P. 1978. Tafoni weathering, with examples from Tuscany, Italy. Zeitschrift für Geomorphologie, 22(1): 44-67.
- MUSTOE, G. E. 1982. The origin of honeycomb weathering. Geological Society of America, 93:108-115.
- MUTTI, E. 1985. Turbidite systems and their relations to depositional sequences. In: Provenance from arenitas. Proceeding Nato-Asi meeting, Cetrazo-Cosenza, Italy. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Netherlands, 65-93.
- ROSELL, J. 1988. Ensayo de síntesis del Eoceno sudpirenaico: El fenómeno turbidítico. Rev. Soc. Geol. España, Márgenes continentales de la Península Ibérica, Vol. 1 (3-4): 357-364.
- ROSELL, J.; REMACHA, E.; ZAMARANO, M. & V. GABALDON. 1985. Serie turbidítica del Cretácico Superior del País Vasco. Bol. Geol. Min., 96: 361-366.
- TWIDALE, C. 1982. Granite landforms. Amsterdam. Elsevier: 372 pp.
- URBANI, F. 1981. Karst development in siliceous rocks, Venezuelan Guiana Shield. Proc. 8th Inter. Congr. Speol., 2:548.
- URBANI, F. 1986. Notas sobre el origen de las cavidades en rocas cuarcíferas precámbricas del Grupo Roraima, Venezuela. Interciencia, 11(6): 298-300.
- VAN VLIET, A. 1982. Submarine fans and associated deposits in the Lower Tertiary of Guipúzcoa (Northern Spain). Thesis Doct., Univ. Utrecht, Netherlands, 180 pp.