

Génesis de los travertinos lacustres: el caso de Banyoles

por JAIME BECH BORRAS *

Con motivo de una serie de estudios de carácter geológico y edafológico que llevamos a cabo en el sector de Banyoles (Bañolas), no hemos podido sustraernos a la tentación de exponer algunas ideas sobre la problemática paleolimnológica de dicho sector.

En la presente nota, que constituye un aspecto parcial de un trabajo sobre los travertinos de Banyoles, después de referirnos a los mecanismos generales de génesis de las calizas lacustres, consideramos este caso concreto, haciendo hincapié en el papel que han desempeñado ciertos factores geoquímicos y físico-químicos y que ayudan a comprender la magnitud de los depósitos objeto de estudio.

I. GENERALIDADES

Los travertinos y tobas lacustres se originan por deposición del carbonato cálcico presente en las aguas que alimentan el lago. Dichas aguas, tanto si se trata de aguas fluviales, como si proceden del lavado lateral de suelos o de manantiales subterráneos, están generalmente muy enriquecidas en carbonato o bicarbonato cálcico, especialmente estas últimas si atraviesan estratos de naturaleza caliza, margosa o yesífera.

En la deposición se distinguen tres tipos de procesos:

- 1) Sedimentación mecánica.
- 2) Precipitación físico-química.
- 3) Precipitación bioquímica.

1. Sedimentación mecánica

El primero de los tres procesos se refiere a los aportes de barros y limos calizos por parte de los afluentes superficiales y subterráneos.

La cinética del proceso viene regulada en gran parte por la ley de Stokes, e influyen en él el caudal de los afluentes y su variación, el gradiente de densidades y de temperatura entre el agua de los afluentes y la del lago, la forma de la cubeta, las diferencias de carga eléctrica entre las partículas en suspen-

* Profesor Encargado de Ampliación de Edafología en la Facultad de Ciencias y Colaborador del Departamento de Geografía de la Universidad de Barcelona.

sión, las agitaciones y torbellinos que se originan en la zona de contacto, la viscosidad del agua, etc. Cuanto mayor es la viscosidad del agua más lenta es la sedimentación. La viscosidad disminuye al ascender la temperatura, por eso la suspensión es más eficaz en los meses invernales.

Además de la sedimentación de los materiales en suspensión en las aguas del lago y sus afluentes, hay que tener en cuenta la erosión de las orillas, que abastece de nuevos materiales en suspensión. Así se explica que en primavera las olas destruyan las costas y distribuyan la caliza más o menos regularmente en todo el sedimento. Esta actividad tiene un máximo en otoño, debido a los fuertes vientos y abundantes lluvias que aumentan la actividad del oleaje, la destrucción de las orillas y la perturbación del fondo.

Respecto a los aportes fluviales, se ha dicho que la ausencia de aportes terrígenos es la condición esencial para la formación de calizas.

Mucha más importancia tienen los dos procesos restantes que poseen el denominador común de constituir mecanismos químicos con una precipitación en la que, en un caso influyen predominantemente factores físicos y geoquímicos — precipitación físico-química o geoquímica — y en el otro factores de tipo biótico — precipitación bioquímica —.

Los dos procesos de precipitación pueden darse con carácter exclusivo en condiciones extremas, aunque lo corriente es que se den simultáneamente con intensidad variable y alternancias más o menos periódicas en el predominio de uno u otro tipo, según las circunstancias geohidrológicas, climáticas y ecológicas. Recordemos a este respecto las variaciones estacionales en el ritmo y tipo de precipitación.

2. Precipitación físico-química

Las aguas que alimentan los lagos, generalmente están muy cargadas de caliza, gracias a estar sobresaturadas en gas carbónico.

El gas carbónico se presenta bajo cuatro formas diferentes:

- 1) *Acido carbónico combinado*, bajo la forma de sal neutra (CO_3^-).
- 2) *Acido carbónico semi-combinado*, bajo la forma de sal ácida (HCO_3^-).
- 3) *Acido carbónico «agresivo»* (Tillmans), disuelto en el agua, bajo la forma de ácido libre y reactivo. También se le llama ácido carbónico independiente.
- 4) *Acido carbónico* o gas carbónico *de equilibrio*. Es el que se halla disuelto en el agua, libre y no reactivo, necesario para mantener en solución el ácido carbónico semicombinado.

Si la concentración en carbónico libre (3+4) es superior al valor de la del ácido carbónico de equilibrio (4), el agua puede atacar aún a la caliza y disolverla. Este exceso de gas carbónico es el que se llama ácido carbónico agresivo e independiente.

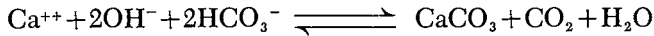
Un agua es tanto más «agresiva» cuanto más caliza disuelve.

Las aguas de lluvia y consiguiente arroyada son muy «agresivas» pues han

absorbido el CO_2 atmosférico. Por ello las aguas de torrentes y ríos afluentes de un lago están muy cargadas de caliza. Y aún más si se trata de manantiales o de afluentes que alimentan subterráneamente al lago, pues en lo profundo se han enriquecido en CO_2 .

Si por el contrario, *la concentración en gas carbónico disuelto en el agua es inferior al valor de la del gas carbónico libre (3+4), la solución no se halla en equilibrio y precipita carbonato cálcico.*

La solubilidad del carbonato cálcico podemos representarla por la ecuación:



Teniendo presente la ley de acción de masa, podemos deducir los siguientes hechos fundamentales:

Cualquier factor que tienda a disminuir la cantidad de agua y de CO_2 disuelto en ella provocará la precipitación de carbonato cálcico.

Cualquier factor que aumente la concentración de Ca^{++} (y en general la salinidad) o bien la alcalinidad, OH^- , que equivale a un aumento de pH, provocará la precipitación del carbonato cálcico.

A continuación describimos los factores del primer grupo, que en sentido amplio podemos calificar de físico-químicos, y los del segundo, de índole geoquímica.

Factores físico-químicos:

- 1) Factores que provocan la disminución de agua en el sistema:
 - Aumento de la temperatura, lo que influye positivamente en la evaporación del agua.
 - Aumento de la superficie, al pasar el agua de los afluentes superficiales o subterráneos a la cubeta lacustre, lo que también favorece la evaporación.
 - Agitación, provocada por el oleaje. Igualmente favorece la evaporación.
 - Disminución de la presión de emergencia de las aguas.
 - Decantación continua, en el caso de existir emisarios.
- 2) Factores que provocan la disminución del CO_2 disuelto:
 - Aumento de la temperatura, que ocasiona la disminución del coeficiente de solubilidad del CO_2 en el agua.
 - Pérdida brusca de presión del CO_2 en los manantiales subterráneos que fluyen al lago.
 - Descenso de la presión cuando el agua alcanza la superficie.
 - También influye la agitación del agua, a consecuencia del oleaje y de posibles corrientes de retorno (*lake turnover*).
 - La actividad biótica, especialmente la fotosíntesis, produce una importante disminución de CO_2 . Pero tal actividad será descrita más adelante, al tratar de la precipitación bioquímica.

De estos dos grupos, solamente el segundo tiene importancia cuantitativa en la práctica.

Factores geoquímicos:

1) Factores que producen un aumento del ion calcio:

La presencia de abundantes sales de calcio solubles en los estratos de la cuenca de recepción de los afluentes y en la misma cubeta lacustre provocan un aumento de cationes en las aguas del lago. Las sales solubles de calcio más frecuentes son los cloruros. También frecuentes, pero con menor solubilidad, son los sulfatos: anhidrita CaSO_4 y yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, especialmente abundantes en terrenos pérmicos, triásicos, eocénicos, oligocénicos y miocénicos.

En cuanto a los carbonatos, calcita CaCO_3 (el aragonito es metaestable en condiciones ordinarias) y dolomita $(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$, a pesar de su escasa solubilidad en agua, ya hemos indicado como pueden disolverse gracias al carbónico agresivo.

En general, las sales más o menos solubles de los estratos proporcionan además otros cationes, principalmente Mg^{++} , Na^+ y K^+ , y en menos cuantía Sr^{++} , Fe^{3+} , Mn^{++} , Al^{3+} , etc. Así podemos hablar de un aumento general de la salinidad. Tal aumento se debe, además de las causas ya expuestas de tipo geoquímico, naturaleza litológica de los estratos, etc., a tres mecanismos de orden físico:

- a) La evaporación.
- b) La decantación.
- c) Variaciones de la temperatura de la capa de salto térmico.

Dichos mecanismos tienden a concentrar las sales disueltas en el agua de la cubeta lacustre, y como ya hemos indicado, por ser el CaCO_3 una de las sales presentes más insolubles, precipitarlo en primer lugar. A veces puede reprecipitar el yeso e incluso ciertos cloruros.

2) Elevación del pH.

Se sabe que los carbonatos precipitan a pH alcalino. Para Kumbrein y Garrels el umbral de precipitación de la caliza o «barrera de la caliza» se halla a un pH de 7,8. Lo mismo opina Reeves.

En cambio, para Schoeller, dicha barrera se halla a un pH de 8,3.

Esta aparente discrepancia de criterios posiblemente se debe a que se considera la precipitación en distintas condiciones de temperatura, presión de CO_2 , concentración iónica, etc.

Vistos los principales factores que influyen en la precipitación, indicamos, siguiendo a Schoeller, las fases que pueden distinguirse en la misma:

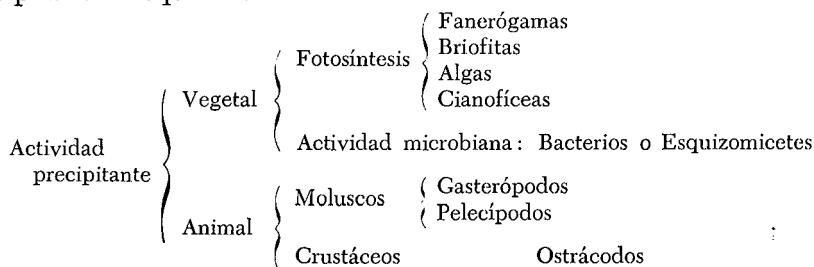
- 1) Reacción química, propiamente dicha, $\text{Ca}^{++} + \text{CO}_3^{--} = \text{CaCO}_3$.
- 2) Producción del estado de sobresaturación, metaestable.
- 3) Desarrollo de gérmenes microscópicos de CaCO_3 sólido.
- 4) Crecimiento de los gérmenes y aparición de un precipitado de naturaleza coloidal y criptocristalino.
- 5) Floculación del precipitado.
- 6) Maduración del precipitado, es decir, formación de cristales bien desarrollados a partir del floculado.

No queremos finalizar este párrafo, dedicado a la precipitación físico-química, sin citar el mecanismo propuesto por Portner (1951). Dicho investigador basa fundamentalmente su teoría en la ley de distribución de Nerst, afirmando que la deposición de la caliza resulta de la formación y mezcla de capas de agua a distinta temperatura y por tanto distinta concentración de CO₂. Entre las dos capas, que corresponden aproximadamente al epilimnion e hipolimnion de los autores clásicos, se establece una zona, capa de salto térmico, con déficit de saturación de ácido carbónico, el cual provoca la precipitación del carbonato cálcico. Su trabajo es muy completo y documentado, por lo que lo consideramos del mayor interés.

3. Precipitación bioquímica

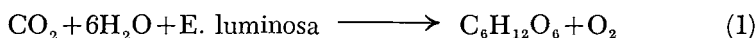
Se debe este tipo de precipitación primordialmente a la actividad vegetal, aunque en mucho menor grado también intervienen ciertos grupos pertenecientes al reino animal (J. Bech, 1969).

Podemos esquematizar en el siguiente cuadro los grupos que llevan a cabo la precipitación bioquímica:

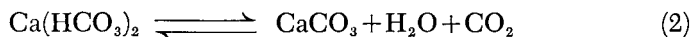


Cuantitativamente, la actividad de mayor importancia, de las indicadas, es la fotosíntesis, que llevan a cabo los vegetales verdes que viven en el lago.

Precipitación debida a la actividad fotosintética. Sabemos que las plantas verdes en la fotosíntesis asimilan anhídrido carbónico, según el conocido esquema que indicamos a continuación:



Dicha reacción interacciona con la siguiente:



Vemos que la fotosíntesis provoca una disminución del CO₂ disuelto en el agua, a consecuencia de lo cual en (2) tiene lugar un inmediato desplazamiento del equilibrio hacia la derecha, con el consiguiente aumento del pH y precipitación de CaCO₃.

Según Raman (1906), Wasmund (1930) y Rivière (1940), dicha asimilación de CO₂ por el fitoplancton es el factor más importante en la precipitación de caliza.

Pero se ha comprobado que los vegetales no sólo toman el CO₂ disuelto

— variedades de ácido carbónico libre y reactivo, es decir «agresivo», y de ácido carbónico libre y equilibrante — sino que también captan el ácido semicombinado, en forma de sal ácida HCO_3^- , e incluso el ácido carbónico combinado, bajo la forma de sal neutra CO_3^{2-} .

Chlorella y los musgos acuáticos sólo asimilan el carbónico libre (Margalef, 1955):

Chara, *Scenedesmus* y las Fanerógamas también utilizan el bicarbonato (Ruttner, 1947-48, cit. en Margalef, 1955).

Antes de pasar revista a los principales vegetales limnícolas que precipitan caliza, añadamos que es la primavera la estación en que la precipitación debida a la fotosíntesis es más intensa. La explicación es la siguiente: el aumento de la temperatura de las aguas del lago lleva consigo: a) una disminución de su viscosidad, por lo que en superficie las algas se reproducen más rápidamente y se sedimentan también a mayor velocidad, y b) un aumento de la intensidad de la fotosíntesis (Ehrke y Maucha, en Portner, 1951) y consiguiente incremento en la precipitación.

Por eso durante la primavera y verano en la mayoría de lagos europeos se hace más patente la deposición de caliza.

Los tallos y hojas de muchas *fanerógamas* que forman parte del Hidrostadión y Helostadión se incrustan en CaCO_3 . Algunas, como *Elodea*, se recubren de modo continuo por una costra caliza, mientras que otras, entre las que destaca *Ceratophyllum*, presentan sólo ligeras incrustaciones depositadas en el interior de sus tejidos. Finalmente se distingue un tercer tipo en el que se da la secreción interna y recubrimiento externo, como *Potamogeton perfoliati*.

Otras fanerógamas que se incrustan son *Lemna* y *Myriophyllum verticillatum*.

Por actuar de soporte de *Chaetophoretum*, también, aunque indirectamente, quedan muchas veces incrustadas plantas de otro grupo: *Phragmites*, *Scirpus*, *Cladium* y *Typha*, e incluso se hallan con frecuencia en el travertino hojas de *Quercus ilex*, *Q. robur*, *Salix*, *Rumex*, etc., que han caído entre los sedimentos calizos, arrastradas por el viento, y que sin haber precipitado caliza han influido mecánicamente en la formación de una trama, compactación y evolución de los barros calizos hacia los travertinos.

Muchas hojas de *briofitas* que forman parte del Hidrostadión se incrustan en caliza. Ya hemos indicado que sólo asimilan CO_2 .

Entre las hepáticas podemos citar: *Riccardia pinguis*, *Pellia Fabroniana*, *Conocephalum (Fegatella)* y *Marchantia*.

Entre los Musgos tenemos: *Trichostomaceae*, *Gymnostomum*, *Didymodon tophaceus*, *Bryum ventricosum*, *Bryum bimam*, *Philonotis calcarea*, *Cratoneuron filicinum*, *Cratoneuron commutatum* sp. *falcatum*, var. *irrigatum*, *Leptodictyum riparium*, *Platyhypnidium rusciforme*, y otros.

Indirectamente, por ser soporte y acompañante de Cianofíceas incrustantes, tiene interés en la precipitación caliza *Fissidens crassipes*.

Las membranas, a veces mucilaginosas, de los filamentos de determinadas *algas* se incrustan con cierta frecuencia. También precipitan CaCO_3 en forma de

fino polvillo cristalino («algal-dust»), que según la mayoría de autores es de calcita, y recubren los tallos y su sustrato. Según otros autores, se trata de finos rafidios de aragonito, que quedan concrecionados sobre los talos de las algas. Así pueden quedar las estructuras concéntricas características de ciertas algas o nodulares de otras. Pero acontece a menudo que a su muerte las agujas se disocian por probable acción bacteriana, quedando calizas sin estructura orgánica denominada «de precipitación química».

En la isocies Hidrostadión, se encuentran las Characeas, principales protagonistas lacustres de precipitación caliza, entre las que destaca *Chara hispida*. Estas especies, como ya hemos indicado, pueden obtener anhídrido carbónico del bicarbonato cálcico.

Sobre el talo («tallo» y «hojas»), e incluso en la «grana», se forman costras calizas, que con el tiempo se desprenden y van a parar al fondo en donde se descomponen, distribuyéndose más o menos regularmente por todo el sedimento y resultando de esta forma una pseudobrechación. Pequeños pedacitos o escamas angulosas de CaCO_3 estarán metidos en un fango de composición similar. Esta deposición y redistribución vienen favorecidas por el hecho de que al final de otoño los talos se doblan, caen al fondo y se descomponen, mientras las costras son destruidas por el oleaje.

Entre las Clorofíceas incrustantes puede citarse las *Codiaceas*, *Chlorella*, *Scenedesmus*, que forma parte del Herpon, y especialmente *Cladophora* que se halla integrada en el Plocon (Margalef) y *Chaetophora*, del Pecton (Margalef), que presenta unas semiesferas compactas con núcleo calizo.

De las Conjugadas se citan la *Desmidiacea Oocardium* y varias *Zignemaceas*, frecuentes en el Pleuston y Pecton (Margalef).

De las Flageladas se han citado diversas *Crisofíceas*.

También las finas frustulas silíceas de las Bacillariofíceas o Diatomeas actúan de gérmenes de precipitación de la caliza.

Finalmente puede citarse varios *Cocolitoforinos*.

El revestimiento mucilaginoso de las *cianofíceas* favorece la fijación de caliza. Así en *Oscillatoria* los cristales recubren los filamentos dando un aspecto moniliforme. A menudo forman nódulos en los lagos actuales. Según Margalef, cuando sus colonias muestran capas superpuestas en las que se dio o se da mayor actividad asimiladora en ciertos niveles — «meristemas» —, éstos vienen indicados por un más abundante depósito de carbonato.

Ecológicamente predominan en la isocies Pecton, aunque algunas corresponden al Herpon.

La principal asociación formadora de travertino es la denominada *Schizothricetum* (Margalef), la cual se halla formando parte del Pecton, al igual que *Rivularietum*.

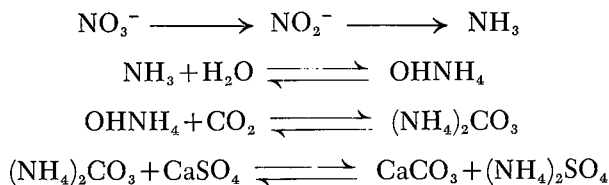
Entre las principales Cianofíceas incrustantes tenemos las siguientes: *Calothrix parietina*, *Dichothrix calcarea*, *Rivularia Biasoletiana*, *Tholypothrix*, *Oscillatoria rubescens*, *Symploca*, *Lyngbya martensiana calcarea*, *Schizotrix fasciculata*, *Schizotrix lardacea*, *Phormidium luridum*, *Phormidium* cf. *cebennense*, *Gongrosira*, *Fusculata cleocapsa* y *Hematites*.

Precipitación debida a la actividad microbiana. Desde hace bastantes años se sabe que diversos grupos de bacterias precipitan caliza, tanto en el mar como en el medio lacustre (Cloud, 1962 y Zobel, 1964).

Por ser muy numerosas las especies que verifican la deposición, indicaremos más bien las principales reacciones propuestas por diversos investigadores:

a) Reducción de los nitratos hasta amoníaco, que en equilibrio con el agua da hidróxido amónico. Este reacciona con el CO_2 disuelto dando carbonato amónico y finalmente éste, a su vez, reacciona con el sulfato cálcico disuelto, obteniéndose carbonato cálcico, que precipita. La última de las reacciones expuestas ya fue anunciada por Murray e Irvine en 1889.

Esquemáticamente, tenemos:

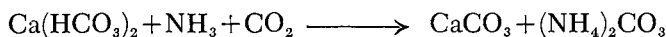


R. M. Field (1931) y Haldan Gee (1932) afirman que el carbonato cálcico precipitado de esta forma es fundamentalmente aragonito, siendo la calcita minoritaria.

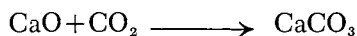
b) Por otra reacción de doble descomposición, enunciada por Kellerman y Smith en 1914:



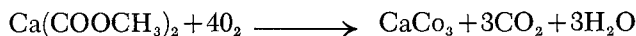
c) Un tercer mecanismo, indicado por R. M. Field (1931) y Haldan Gee (1932), es el siguiente:



d) Los mismos investigadores últimamente citados consideran también importante el siguiente mecanismo bacteriano:



e) Finalmente, indicamos otra reacción de precipitación microbiana, la cual ya fue expuesta en 1919 por Berkeley, y que consiste en la oxidación del acetato cálcico:



Precipitación debida a la actividad animal. La precipitación bioquímica de caliza debida a la actividad animal es mucho menos importante que la debida a la actividad microbiana y muchísimo menos que la debida a la fotosíntesis. Sin embargo, debemos dejar constancia de la secreción de caliza que verifican algunos animales limnícolas, especialmente moluscos lacustres. Ahora bien, los caparzones de gasterópodos, pelecípodos y ostrácodos de agua dulce nunca son constructores de travertino, más bien, como afirma D. V. Nalivkin (1956),

desempeñan un papel secundario en la formación de dicha caliza. Así, al morir dichos animales, sus caparazones pueden quedar en los barros calizos y se fosilizan. Este es su papel pasivo, secundario, en la formación de calizas lacustres.

Entre los Palecípodos son frecuentes *Unio* y *Anodonta*; más numerosos son los Gasterópodos: *Lymnaea*, *Physa*, *Planorbis*, *Spirorbis*, *Cyclas*, *Ancylus*, *Scocinea*, *Clausilis*, *Torquilla*, *Bulimus*, etc.

También podríamos citar diversos Ostrácodos con actividad precipitante.

II. ANALISIS DEL CASO DE BANYOLES

1. Situación de la cuenca lacustre

Geográficamente, la cuenca lacustre de Banyoles se halla situada en la confluencia de tres comarcas: al SE. se halla el Gironés, de la que puede decirse forma parte, el Empordà al E. y la Garrotxa al O.-NO. Las coordenadas del lago actual son:

42° 7' lat. N. y 2° 47' long. de Greenwich. Su altura sobre el nivel del mar es de 175 m.

El contorno del lago tiene forma de ocho irregular, midiendo su perímetro 7.790 m. aproximadamente y su superficie se acerca a las 100 ha.

La cuenca lacustre de Banyoles se halla excavada en las margas azules («xalió» en el país) del Eoceno medio, aprovechando el compartimento de la gran falla, que siguiendo una dirección N.-S., separa el núcleo montañoso de la Garrotxa de la llanura del Empordà. Dicha falla, de probable edad pliocena, según Solé Sabarís, corta la bóveda de un diapiro, cuyos yesos se han desparramado por toda la base de la cuenca. Estos yesos, que alcanzan un espesor de más de 200 metros (Vidal Pardal), yacen sobre las calizas de la base del Eoceno y han sido sometidos a un largo proceso de karstificación por las aguas subterráneas que aprovechando la falla, proceden de la Garrotxa. Tal karstificación lleva consigo la progresiva disolución de los yesos y hundimientos (tipo «bofia» del karst salino, o dolina del calizo) que han configurado las líneas generales de la cuenca lacustre, sólo modificada posteriormente por el relleno de los travertinos precipitados y por los episodios tectónicos pleistocénicos.

Así, en el conjunto resultante podemos distinguir cuatro elementos geomorfológicos destacados:

a) TERRAZA TRAVERTÍNICA «ALTA»: a unos 40 m. sobre el nivel del lago actual. Forma la altiplanicie de Usall-Espolla-Martís, situada al NE. del mismo, con un área aproximada de unos 12 km² y limitada al N. por el río Ser, afluente del Fluviá, cuyo talweg la corta en su borde NE. Las lomas pliocénicas de Santenys la limitan por el E.

Se admite que dicha «meseta» fue el primitivo emplazamiento del lago.

El travertino que la constituye es muy duro y compacto, siendo difícil apreciar en él la presencia de restos orgánicos. Sin embargo, nosotros hemos hallado numerosos gasterópodos limnícolas fosilizados.

En su parte superior se presenta karstificado, con fenómenos de disolución que han originado un suelo rojo, probablemente terra rossa.

En la base el travertino es de naturaleza arenosa.

La potencia de esta formación, según Vidal Pardal, es de 140 m., por lo menos en Espolla, lugar que, como sugiere Solé Sabarís, «debe corresponder al centro de la antigua cuenca lacustre».

b) TERRAZA TRAVERTÍNICA «BAJA»*: a unos 4 a 7 m. sobre el nivel del lago actual. Forma la amplia llanura de Banyoles, Mata y Cornellà, que rodeando al lago, se extiende hacia el W. y SE., en un área aproximada de unos 21 km². La constituye un travertino blando, hojoso, poroso, muchas veces estratificado, con incrustaciones de *Chara* y otras plantas acuáticas, plumas de ave, etc. El nombre popular de esa roca, que también se explota para la construcción, es el de «turo». Vidal y Mascaró la denominan toba, diferenciándola bien por sus caracteres físicos del travertino «antiguo» de Usall, aunque ya Alsius (1878) les reconoció idéntico origen lacustre, además de «idéntica composición mineralógica».

Esta formación alcanza un espesor máximo de 80 m. en su parte W.

c) LAGO DE BANYOLES (ACTUAL): Se trata de un limnocreno o lago-manantial, resto de lo que fue gran lago pleistocénico, reducido posiblemente a una veinteava parte de su área inicial. Puede afirmarse que del mismo sólo quedan en la actualidad los embudos de los manantiales del fondo. Tales embudos corresponderían a los «estanyols» que bordean al lago: Montalt, del Vilar, de la Cendra, etc., y especialmente al fondo de la cubeta actual. Su profundidad es de 42 m. el del N. y 62,5 m. el del S. (L. M. Vidal), estando unidos por un umbral poco profundo, correspondiente a la estrangulación del ocho y que según Bentabol se debe a los aportes de la Riera Castellana.

La zona litoral tiene muy poca extensión.

Del borde SE. parten cinco o seis canales emisarios que vierten sus aguas al río Terri, afluente del Ter.

Los sedimentos en la cubeta actual alcanzan espesores de 20 a 70 m. según la localización. De abajo a arriba se halla una capa basal de arenas, una zona media con limos grisáceos y un nivel superior travertínico, que puede alcanzar hasta 20 m. de potencia.

En ciertas zonas próximas al lago aparece sobre el travertino y entre barro grisáceos una capa de turba. Dicha turba se ha hallado especialmente en zanjas abiertas en campos próximos a Les Estunes. Nosotros hemos recogido muestras en la orilla opuesta, cerca de Lió.

El balance hídrico, según resumen de los datos de L. M. Vidal, es como sigue:

Diariamente salen del lago 53.000 m³ de agua.

Diariamente entran al lago 1.500 m³ de agua por afluentes superficiales.

* El autor admite la existencia de una posible *terrazza media*. Véase BECH, 1971. *Contribution a la connaissance de la chronologie des terrasses lacustres de Banyoles (Gerona)*. Bulletin Ass. Fr. E. Q. 1971-A, 15-20, París.

Luego, los manantiales subterráneos aportan un caudal de 600 l/seg.

Este régimen hídrico especial, con una circulación forzada de abajo arriba, hace que posiblemente no podamos encasillar el lago de Banyoles ni en la categoría de dimíctico, ni en la monomíctico (en el sentido de Hutchinson, 1957). Probablemente no hay una estratificación térmica típica, o caso de que exista, se trata de una estratificación escasa o muy peculiar. Creemos sería de gran interés su investigación.

d) **ESTANY DE ESPOLLA**: situado unos dos kilómetros al N. del lago de Banyoles (3º) y sobre la altiplanicie de Usall-Espolla, formada por la terraza de travertino antiguo (a), como ya hemos indicado.

Es un limnocreno intermitente, que constituye un «trop plein» o aliviadero del lago actual de Banyoles. Sólo mana cuando el exceso de caudal de las aguas que siguen el curso de la falla no puede salir por el fondo del lago.

Mana, en época de lluvias, unos 200 m³. de agua por minuto, pero pueden salir caudales superiores. La temperatura, pH y composición química del agua es la misma que la de los manantiales profundos del lago (temperatura 14-18° C y pH 7,5 aprox.).

2. Precipitación de travertinos y calizas lacustres

Por lo dicho hasta aquí vemos que la deposición de calizas ha desempeñado un importante papel en la cuenca lacustre de Banyoles.

Dicho fenómeno ya fue reconocido por los primeros investigadores: Alsius, L. M. Vidal, Bentabol, Mascaró, etc.

Alsius, valorando el hallazgo de la mandíbula neandertalense descubierta por Roura a unos 4 m. de profundidad, en el travertino de la terraza baja (cronología musteriense), así como los hallazgos de restos neolíticos y de monedas y útiles romanos en niveles superiores del mismo travertino, nos demuestra la continuidad de la precipitación en período histórico.

L. M. Vidal (1908), refiriéndose al lago, puntualiza: «La naturaleza de las aguas del mismo ha debido cambiar, por cuanto no parece formarse hoy tan abundantemente en su seno la toba caliza muy esponjosa que antes se sedimentaba en toda la extensión del lago...»

Mascaró (1914) afirmaba: «las desigualdades del terreno aluvial que le sirve de lecho y las circunstancias fortuitas que pudieron actuar al precipitarse el CaCO₃ debieron aumentar o disminuir (según las circunstancias) el espesor de la capa de caliza. La sedimentación química, productora de la toba caliza, unida a las sedimentaciones mecánicas por el acarreo eventual de arcillas y arenas fueron lentamente disminuyendo la profundidad del lago cuaternario.»

Y entre los investigadores contemporáneos, Solé Sabarís (1957) afirma que el travertino esponjoso de la terraza baja se forma actualmente en el fondo del lago, y Margalef (1944) indica un mecanismo bioquímico de precipitación: «En los sitios adecuados sigue formándose travertino por la actividad de las algas cianofíceas.»

Siguiendo el orden propuesto en la parte introductoria de este trabajo, comentaremos las peculiaridades que se dan en los tres tipos de procesos:

a) **SEDIMENTACIÓN MECÁNICA.** Los limos grisáceos, procedentes de la meteorización y arrastre por el agua subterránea a presión de las margas eocénicas, aumentan bastante hacia el fondo del lago, debido a la emergencia del agua procedente de los manantiales subacuáticos. A este reflujo se opone la sedimentación mecánica gravitacional, y el resultado depende del caudal y presión con que fluya el agua. Dichos valores no son constantes, dependiendo de la época e intensidad de lluvias, así como de las oscilaciones barométricas. A la conjunción de estos factores se debe la remoción brusca y aperiódica de las «cendras» o barros de ciertos estanyols subsidiarios del lago de Banyoles.

También influyen el oleaje y la dirección N.-S. de las corrientes lacustres.

Además, en la sedimentación mecánica, los materiales procedentes de los afluentes desempeñan su papel, como ocurre actualmente con los de la Riera Castellana, que habrán variado con la intensidad de los ciclos erosivos. Así, por ejemplo, tendría un valor muy elevado al principio de la cuenca lacustre, pues, en la base de la terraza de travertino antiguo, hemos reconocido cantos rodados y gravas que pasan en dirección ascendente, gradualmente a gravillas y arenas que se cementan, dando los travertinos arenosos. Este hecho se aprecia muy bien en la zona de Martís, y posiblemente indica un episodio climático de gran pluviosidad.

De acuerdo con lo dicho en la primera parte, vemos que mientras existen aportes terrígenos, no se forman travertinos. Sólo bajo una dinámica más tranquila pueden formarse tales rocas.

b) **PRECIPITACIÓN FÍSICO-QUÍMICA.** Respecto a los factores físico-químicos propiamente dichos del grupo 1) (los que provocan la disminución de agua en el sistema), concurren los siguientes:

Disminución de la presión de emergencia de las aguas al salir de los manantiales del fondo de la cubeta con el consiguiente aumento de superficie. Ello favorece la evaporación del agua. Según Wasmund (1934) se evaporan 5.372 m³ diarios, aunque Margalef cree exagerada dicha cifra.

Igualmente, influye en la evaporación la agitación provocada por el oleaje. Nosotros hemos observado, en días de fuerte tramontana, olas de hasta 50 cm.

También, en Banyoles, se da una decantación continua, pues ya hemos indicado anteriormente que salen 53.000 m³ al día.

En cuanto a los factores del grupo 2) (que provocan la disminución del CO₂ disuelto), se dan especialmente los relacionados con la pérdida de presión de disolución del CO₂ en el agua de los manantiales subterráneos que fluyen al lago.

Respecto a los factores geoquímicos destaquemos en primer lugar los que producen un aumento del ion calcio (1):

Hay una gran cantidad de sales solubles de calcio, tanto en la cuenca de alimentación, como en el subsuelo de la misma cubeta lacustre. Así en la

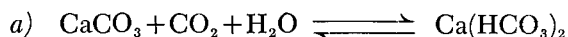
cuenca de recepción podemos citar las calizas y margas eocénicas de las montañas de La Garrotxa (Serra de Finestres, del Corb, Puig-Sacalm, Bassegoda, El Mont, etc.), y los yesos de Besalú, Beuda, Maià y Banyoles. Hemos hallado yesos hasta en el talweg del Fluvià, cerca del discutido e hipotético emplazamiento de la presa de Esponellà.

En cuanto al subsuelo de la cubeta lacustre, recordemos la gran masa de yesos diapíricos, puestos de manifiesto en los ya citados sondeos de Vidal Pardo. Dichos yesos se hallan junto a las margas azules del Eoceno. El calcio de estos yesos actúa de «ion extraño» en el sistema $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$ y hace que por «efecto salino» aumente la solubilidad de las calizas eocénicas y sobrealimenten de bicarbonato cálcico las aguas de los manantiales del fondo de la cubeta.

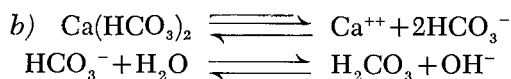
Si a lo expuesto añadimos la gran agresividad de las aguas subterráneas que abastecen el lago, no es difícil adivinar que se cargarán de múltiples iones, especialmente Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^- y HCO_3^- .

El mecanismo físico-químico, por el cual, gracias a la presencia de yesos, se refuerza la precipitación de caliza en la zona más superficial de las aguas del lago, es el siguiente (inspirado en Rivière y Vernhet).

Partiendo de la conocida reacción reversible de solubilización de la caliza:



El bicarbonato se hidroliza siguiendo la reacción reversible:



Aplicando la ley de acción de masa a la reacción b), vemos que todo aumento de la concentración del medio en iones Ca^{++} (en este caso, los procedentes del yeso diapírico) tiende a disminuir la hidrólisis, dando un aumento de bicarbonato no hidrolizado y por consiguiente hace retroceder la reacción a), provocando una sobresaturación de CaCO_3 , que tiende a precipitar.

Así, además de la probable coincidencia con períodos pluviales intensos, la presencia de la gran masa de yesos en la cuenca de Banyoles, explicaría probablemente la enorme extensión de travertinos lacustres, que alcanzan alrededor de los 35 km².

Según Mascaró, para el lago actual, la dureza total es de 54 grados y 36 el valor de la dureza permanente.

Según el análisis de Novellas (citado por L. M. Vidal) hay de 0,28 a 0,29 g/l. de CaO, 0,05 g/l. de MgO y para el SO_3 , 0,39-0,41 g/l.

En cuanto al pH, el agua presenta una notable alcalinidad, en general algo superior a pH 7,5. Ello se debe a que el ácido carbónico, por ser ácido débil, está poco disociado, mientras que la cal, base fuerte, lo está mucho, lo que confiere al agua su alcalinidad.

No se presentan cambios bruscos de pH, debido a que los grupos $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 : \text{H}_2\text{CO}_3$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 : \text{H}_2\text{CO}_3$ son muy buenos sistemas amortiguadores. Así el agua se mantiene siempre alcalina, con valores que oscilan entre

7,2 y 7,8. Y no olvidemos lo indicado anteriormente a propósito del pH de la «barrera de la caliza».

c) PRECIPITACIÓN BIOQUÍMICA. Como dijimos en las generalidades, se debe fundamentalmente a la actividad fotosintética.

Del trabajo de Margalef (1944) hemos seleccionado toda referencia a especies con actividad incrustante.

Aunque al principio hemos expuesto múltiples mecanismos bacterianos de deposición de calizas lacustres, este aspecto está por investigar en Banyoles. En el trabajo citado, Margalef se refiere a aspectos ecológicos de la flora y fauna lacustre, exceptuando las bacterias.

Respecto a la actividad vegetal, podemos citar la presencia de las siguientes especies incrustantes:

Fanerógamas: *Potamogeton perfoliati*, *Myriophyllum verticillatum*.

Briófitas: *Fissidens crassipes*.

Algas: *Chara hispida*, *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Cladophora*, *Chaetophora elegantis*, *Chaetophora elegans longipila*, *Oocardium*, diversas *Zignemaceas*.

Cianofíceas: *Schizothrix fasciculata*, *Schizothrix lardacea*, *Calothrix parietina*, *Simploca*, *Rivularia Biasolettiana*.

Schizothricetum y *Charetum hispidas* son las dos asociaciones formadoras de travertino más eficaces, y según el autor de referencia, siguen formando en la actualidad tobas calizas en Banyoles.

En cuanto a la actividad animal, tanto los comentarios como la lista de especies expuesta en las generalidades, tienen plena validez para el caso de Bañolas, siendo de notar nuestro hallazgo de Ostrácodos en los travertinos de Usall.

III. CONCLUSIONES

Al llegar a este punto, creo que estamos en condiciones de responder a una serie de preguntas que plantea la problemática de los travertinos de Banyoles. A saber:

1) ¿Existe precipitación en la actualidad? En caso afirmativo, ¿de qué tipo es?

Hemos visto que existe precipitación en la actualidad, probablemente de tipo mixta, es decir, físico-química y bioquímica.

2) ¿Ha existido siempre la misma intensidad de precipitación?

Podemos afirmar que no ha existido siempre la misma.

Verosíblemente podemos relacionar los períodos de apogeo, con pluvio-

glaciales pleistocénicos, equivalentes al sur de los Pirineos, a las respectivas glaciaciones europeas. Tal afirmación la hacemos basándonos:

- a) en correlaciones paleoclimáticas con otras zonas bien descritas de la Francia mediterránea, España y norte de África.
- b) en una prueba ecológica, basada en una observación de Margalef (1944), que halla un «carácter preglaciar» en la fauna de Banyoles (*Diaptomus salinus* y *Gammaria pungenis*).
- c) en consideraciones sedimentológicas: la gran cantidad de travertinos de la meseta de Usall-Espolla y del llano de Banyoles, implica un enorme caudal de agua para originarlos, caudal sólo compatible con períodos climáticos muy húmedos. Probablemente coinciden con fases pluviglaciales, a pesar de que Zeuner afirma que en lagos de origen tectónico no siempre puede establecerse una correlación en tal sentido.

3) ¿Es cierto que los travertinos «antiguos» de Usall-Espolla, se deben únicamente a la precipitación físico-química, como parece deducirse por su aspecto?

Debemos puntualizar que no se ha originado por exclusiva precipitación físico-química, como pudiera parecer por su aspecto compacto, cristalino a veces, duro e «inorgánico», sino que también han desempeñado su función los mecanismos bioquímicos. Nosotros hemos hallado numerosos gasterópodos limnícolas dentro de su masa, así como en observación de láminas finas al microscopio hemos visto estructuras «algales», especialmente de *Chara* y Ostrácodos (BECH y FERNÁNDEZ, 1970).

Seguramente muchas estructuras orgánicas iniciales han desaparecido por compactación, recristalización y demás mecanismos diagenéticos, de ahí su aspecto «inorgánico».

4) ¿Únicamente la precipitación bioquímica ha originado el travertino tobaceo de la terraza «baja» de Banyoles?

El travertino «reciente» o «turo» del Pla de Banyoles y Mata, parece que nos indica una mayor intensidad de precipitación bioquímica y una menor participación de la físico-química.

De todas maneras he observado numerosos lentejones de limos, claro indicio de aportes mecánicos.

5) ¿Puede haber influido alguna circunstancia especial, en la deposición de tan ingente cantidad de travertino?

Además de las fases pluviglaciales ya citadas, la presencia de la masa de yesos diapíricos ha jugado un papel decisivo. Ya hemos desarrollado el doble mecanismo antagónico de acción de masa que verifica el Ca^{++} procedente de los yesos. Por «efecto salino» provoca un aumento en la solubilidad de las calizas y margas del fondo de la cubeta, incrementando la concentración de bicarbonato cálcico en el agua, y al contrario, en la zona superficial, por acción de masa, favorece la precipitación de la caliza. Se reseñan los mecanismos generales de formación de travertinos y calizas lacustres, indicando el papel de la sedimentación mecánica, precipitación físico-química y bioquímica.

Respecto al caso de Banyoles (prov. Gerona), se destaca el importante papel geoquímico de los yesos de la cuenca lacustre en la génesis de los travertinos y el mecanismo físico-químico de acción de masa del Ca^{++} , que coadyuvan en la deposición de la gran cantidad del mismo.

Se razonan argumentos en pro de la presencia de fases pluvio-glaciales en un lugar de las correspondientes glaciaciones pleistocénicas europeas. Tales «pluvio-glaciales» explican mejor aspectos paleoecológicos y de precipitación físico-química.

En cuanto a la precipitación bioquímica actual se han seleccionado datos de Margalef.

Se ha logrado puntualizar la participación bioquímica en la génesis de los travertinos, aparentemente «inorgánicos», de la terraza de Usall-Espolla.

BIBLIOGRAFIA

a) General

- BECH, J. (1969). — *La precipitación bioquímica de travertinos y calizas lacustres*. P. Ins. Biol. Apl. 46, 65-74. C.S.I.C. Barcelona.
- DUSSART, B. (1966). — *Limnologie, L'Etude des Eaux Continentales*, Gauthier-Villars, Paris, 1966.
- HUTCHINSON, G. E. (1957). — *A treatise on Limnology*, vol. I, John Wiley sons inc. New York, 1957.
- MARGALEF, R. (1955). — *Los organismos indicadores en la Limnología*, Publ. XII. Instituto Forestal de Invest. y Exper. Min. de Agricultura, 300 págs., Madrid, 1955.
- NALIVKIN, D. V. (1956). — *Étude des facies. vol. II. Conditions géographiques de la formation des sédiments*. Akad. Nasik SSSR. et del geol. geogr. Nauk. M-L.
- PORTNER, C. (1951). — *La formation du sédiment calcaire du lac de Neüchatel*, Schweiz, Z. Hydrol. 13, 2, 199-290, 1951.
- REEVES JR C. C. (1968). — *Introduction to Paleolimnology. Developments in Sedimentology II*, Elsevier Publ. Company, 1968.
- RIVIÈRE, A. et VERNHET, S. (1957). — *Contribution à l'étude physicochimique de la sédimentation calcaire*, Comtes Rendus Ac. Sci. Paris, 1957. 244, 2080-82.
- SCHMITT, CL. (1955). — *Contribution à l'étude du système Chaux-Carbonate de Calcium, Bicarbonate de Calcium-Acide carbonique-eau*. Anns. École nat. Sup. mécan. Nantes, 156, 1955.
- SCHOELLER, H. (1962). — *Les eaux souterraines*, Masson et cie. Paris.
- SLOSS, L. L. (1947). — *Environements of limestone deposition*, Jour. Sedim. Petr. 17, 1947, 109-113.
- TERMIER, H. ET TERMIER, G. (1960). — *Erosion et sédimentation*, Masson et cie. Paris.

b) Especial

- ALSUS, P. (1872-1881). — *Ensaig històric de la Vila de Banyoles*.
- AYUNTAMIENTO DE BAÑOLAS (1907). — *Aguas de Bañolas*.
- BARNOLA, J. M.^a de (1920). — *Notas fitostáticas sobre la vegetación briológica de las cercanías del lago de Bañolas*, Broteria, serie botánica, vol. XVIII, pág. 64, 1920.
- BECH, J. (1969). — *Datos para el conocimiento geoquímico y mineralógico de los travertinos de Bañolas (Gerona)*. Publicación del Instituto de Investigaciones Geológicas de la Diputación Provincial, 23, 43-53, Barcelona, 1969.
- (1969). — *Las terrazas lacustres de Bañolas (Gerona)*. Información Arqueol. 3, 96, Barcelona, 1969.

- (1970). — *Nuevo hallazgo de Hippopotamus amphibius major en Bañolas (Gerona)*. Acta Geológica Hispánica. C.S.I.C. V, 2, 51-53, Barcelona.
- (1970). — *Contribution a la connaissance de la chronologie des terrasses lacustres de Banyoles (Gerona)*. Bull. Assoc. Française E. Quaternaire, 1971-1, 15-20, Paris.
- BECH, J. y FERNÁNDEZ DELGADO, J. M. (1970). — *Aportación al conocimiento de las estructuras de los travertinos de la terraza alta de Bañolas (Gerona)*. Publ. Inst. Inv. Geol. Dip. Prov. Barcelona. 24, 63-76.
- BENTABOL, H. (1910). — *Hidrología superficial y subterránea de la provincia de Gerona. Estudio sobre los lagos y manantiales de Bañolas, Espolla y San Miguel de Campmajor*. Bol. de la Comisión del Mapa Geológico de España, vol. XXX, cuad. 2.º, 1910.
- BOLÓS, M. T. de (1957). — *Las terrazas del Fluvià*, INQUA.
- MARGALEF, R. (1944). — *Materiales para el estudio de la biología del lago de Bañolas (Gerona)*, P. Inst. Biol. Apl. I, págs. 25-78, Barcelona, 1944.
- MASCARÓ, J. M.ª (1914). — *Topografía médica de Bañolas, Gerona, 1914*.
- et al.ª (1929). — *Abastecimiento de aguas potables a la ciudad de Bañolas. Memoria, 1929*.
- MEMORIA MAPA GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. Hoja 295. BAÑOLAS.
- MENÉNDEZ AMOR, J. (1966). — *Estudio esporo-polinico de los sedimentos del lago de Bañolas (Gerona)*, V Congreso Int. Est. Piren. Jaca-Pamplona 1966. Resum. de las Comun. pres. con anter. al Congresc. C.S.I.C. Zaragoza, 1966.
- SAN MIGUEL, M. y MARCET, J. (1926). — *Guía de la excursión C4 del XIV Congreso Geológico Internacional*, Madrid, 1926.
- SOLÉ SABARÍS, L. (1957). — *Empordà et region volcanique d'Olot*. INQUA, V Congrès International, Barcelona-Madrid, 1957.
- SOLÉ SABARÍS, L. (1958). — *Geografía de Catalunya I*, Ed. Aedos, Barcelona, 1958.
- VIDAL, J. (1925). — *L'Estany de Banyoles*, Girona, 1925.
- VIDAL PARDAL, M. (1954). — *Los yesos de la comarca de Bañolas (Gerona)*, Min. Obr. Públ. Jef. Sond. Cim. e Inf. Geol. Bol. n.º 1, págs. 26-28, Madrid, 1954.
- VIDAL PARDAL, M. (1957). — *La alimentación subterránea del lago de Bañolas. Resultado de los ensayos con fluoresceína; solución al problema de la regulación del río Fluvià*, Rev. Obr. Públ., año CV, n.º 2903, págs. 105-107, Madrid, 1957.
- (1959). — *El borde del bloque del Ampurdán en la zona de Bañolas*, Est. Geol. t. XV. Homenaje al Dr. M. S. Miguel de la Cámara, págs. 391-92, Madrid, 1959.
- (1960). — *La alimentación subterránea del lago de Bañolas y algunos datos sobre los depósitos lacustres de sus inmediaciones*, Min. Obr. Públ. Bol. n.º 7, mayo 1960, Serv. Geol. Infor. y Est. págs. 23-40.
- WASMUND, E. (1934). — *Der Karstquellsee Estany de Banyoles in Katalonien*, Geographische Wochenschrift, vol. 2, pág. 221, 1934.

RESUME

Sont signales les mécanismes généraux de formation de travertins et calcaires lacustres, indiquant le rôle de la sédimentation mécanique, précipitation physico-chimique et biochimique.

Au sujet du cas de Banyoles (prov. Gérone), se détache le rôle géochimique important des vases de la cuvette lacustre dans la genèse des travertins et le mécanisme physico-chimique de l'action de masse du Ca, qui aidèrent au dépôt d'une grande quantité de ce dernier.

Sont raisonnés les arguments en faveur de la présence de phases pluvio-glaciales au lieu des glaciations pléistocéniques européennes correspondantes. Ces phases «pluvio-glaciales» expliqueraient mieux les aspects paléoécologiques et de précipitation physico-chimique de la zone étudiée.

Quant à la précipitation biochimique actuelle, les données de Margalef ont été admises.

A été mise au point la participation biochimique dans la genèse des travertins apparemment «inorganiques» de la terrasse de Usall-Espolla.

ABSTRACT

The general mechanisms of the formation of «travertines» and limestone lake deposits are here outlined with special emphasis on the aspect of mechanical silts and physio-chemical and bio-chemical precipitations.

In the case of Banyoles (province of Gerona), it is pointed out the important geo-chemical aspect of the chalk deposits in the lake basin in the «travertines» formation and also the physio-chemical mechanism of the mass action of Calcium, which helps in the silting of great quantities of it.

Reasons are given in defense of the presense of «pluvio-gracial» phases instead of the corresponding European pleistocene formations. These «pluvio-gracial» would explain much better the paleo-ecological aspects and the physio-chemical precipitations in the zone under study.

Data from Margalef has been taken into account regarding the present bio-chemical precipitation.

It is pointed out the bio-chemical participation in the apparently inorganic «travertines» in the Usall-Espolla terrace (layer?).