

## PRECIPITACIÓN DE TRAVERTINOS POR AGUAS PETRIFICA DORAS EN HUANCVELICA (PERÚ). UN PATRIMONIO GEOLÓGICO CON HISTORIA

Dr. Ing. Enrique Orche García

Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero (SEDPGYM)

[eorche@gmail.com](mailto:eorche@gmail.com)

### RESUMEN

Por distintas razones, tanto la formación de travertinos (debido a su empleo en la construcción de edificios) como la petrificación de hojas y ramitas por aguas calcáreas (al ser un fenómeno geológico curioso) han sido objeto de comentarios por parte de varios autores de la época virreinal, sin que llegaran a entender dichos procesos. De hecho los vegetales petrificados fueron confundidos durante mucho tiempo con auténticos fósiles. Ambos fenómenos tienen su origen en la precipitación de carbonatos a partir de aguas subterráneas ricas en calcio. Sin embargo, con el tiempo, las ideas y los conocimientos fueron evolucionando de modo que a finales del siglo XVIII eran ya cercanos a los actuales. Para que se comprenda bien el fenómeno, en el presente trabajo se describe la precipitación de travertinos a partir de aguas calcáreas, se comenta la importancia del hábitat vegetal a que dan lugar estas aguas, se describen los testimonios virreinales al respecto, y se finaliza con una propuesta de catalogación de estos travertinos como patrimonio geológico.

**PALABRAS CLAVE:** Calidad del aire, espacios subterráneos, legislación, minería subterránea, museos.

## TRAVERTINE PRECIPITATION BY PETRIFYING WATERS IN HUANCVELICA (PERU). A GEOLOGICAL HERITAGE WITH HISTORY

### ABSTRACT

For different reasons, the formation of travertine (due its use in buildings construction) and petrification of twigs and leaves by waters with calcium bicarbonate (as curious geological phenomenon) have been commented by some viceregal authors, without understanding such processes. In fact, these petrified vegetables were confused with real fossils for a long time. Both phenomena are originated by carbonate precipitation from calcium-rich groundwaters. In the fullness of time, ideas were fitting to new knowledge so at the end of XVIII century they were close to present ones. In order for the phenomenon to be well understood, in this paper the precipitation of travertine's from calcareous waters is described, the importance of the plant habitat to which these waters give rise is discussed, the viceregal testimonies are reproduced in this regard, and it ends with a proposal for the cataloging of these travertine's as geological heritage.

**KEY WORDS:** Heritage, Huancavelica, Peru, petrification, travertine, water

### 1. Introducción

La llegada a América de los españoles a finales del siglo XV les puso en contacto con una naturaleza casi siempre distinta de la que estaban acostumbrados a ver en Europa. La curiosidad de muchos de ellos, unida a su condición de cronista, viajero, naturalista o intelectual, dio pie a que rápidamente descubrieran los hechos diferenciales entre ambos continentes plasmándolos en sus escritos, fueran científicos, descriptivos o simples informes oficiales. Entre las cuestiones que más llamaron su atención cabe citar la deposición de calizas relacionadas con los manantiales (travertinos) y la propiedad de algunas aguas de petrificar las sustancias con las que entraban en contacto. Naturalmente aún era pronto para que estos fenómenos fueran explicados sin los conocimientos químicos y geológicos que hoy se tienen; en su defecto, las personas más formadas o intelectualmente más inquietas, recurrieron a las ideas de la escuela Platónico-Aristotélica o de la propia Biblia. Como en los siglos XVI y XVII las ciencias geológicas sólo estaban planteadas en sus rudimentos conceptuales y metodológicos, se ignoraba la forma en que se producían los precipitados químicos y el significado y origen de los fósiles. Tampoco se conocían las

diferencias entre éstos y las costras calcáreas depositadas por el agua sobre vegetales por precipitación del carbonato cálcico, hecho que ciertamente notaron que sucedía con mucha rapidez. Téngase en cuenta que el nacimiento de la Paleontología en España fue tardío en relación con otros países. La situación ha sido descrita por determinados autores [1, 2] a los que se remite para mayor detalle.

*Las aguas de las cuales se producen piedras* eran conocidas desde la antigüedad y a ellas se refieren Plinio y Vitrubio impresionados por fenómeno. En España fueron reseñadas en 1697 por Alfonso Limón citando la presencia de manantiales en Paracuellos (Madrid), los Montes de León, Requena y Córdoba. Sin embargo, a ellas el autor dedica apenas una página de las 431 que tiene su obra, lo que da idea de la escasa atención prestada al asunto que presentó como una mera curiosidad natural [3].

En Hispanoamérica, la petrificación de los restos vegetales y la formación de los depósitos de travertinos observados por los españoles tuvieron un tratamiento similar al de Limón en España, citándose como un sorprendente fenómeno científico, especialmente hasta mediado el siglo XVIII.

En 1552, apenas 30 años después de la llegada de los españoles al Perú, López de Gomara [4] ya indica la presencia de aguas petrificadoras cargadas de carbonato en Chilca, una villa situada en la costa pacífica, 70 km al sur de Lima. En 1780 estas aguas son citadas de nuevo por Hipólito Ruiz [5]. Otras aguas con estas peculiaridades se encuentran en el cerro Pacocaba, a una legua de las minas de Berenguela de Pacajes, en Santiago de Machaca, departamento de La Paz, Bolivia [6, 7], en Tanlagua, al norte de Quito [8, 9] y Coccoño, cerca de Popayán [8]. Sin embargo, de todos los yacimientos travertínicos conocidos, el de Huancavelica (Perú) acapara la mayor parte de los comentarios debido a sus grandes dimensiones y al hecho de que la ciudad fue un enclave fundamental para la economía colonial a causa de sus importantísimas minas de mercurio, elemento imprescindible para la obtención de plata por amalgamación de los minerales argentíferos de Potosí. Por esta razón, a ella acudieron curiosos y naturalistas, por ella pasaron numerosos viajeros y en ella moraron temporalmente científicos enviados por la Corona para dirigir la mina o colaborar en su mejora; muchos de ellos dejaron testimonios del fenómeno travertínico y de las petrificaciones de vegetales.

En el presente trabajo se actualiza y amplía otro anterior copublicado por el autor [10] en el que se reunía las descripciones más representativas que, al respecto y en distintos momentos, escribieron los españoles en sus viajes americanos, incluyendo las razones que algunos de ellos aventuraban para explicar los citados procesos naturales.

## 2. Precipitación de travertinos

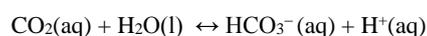
La palabra travertino es una corrupción de *lapis tiburtinus*, una piedra de construcción romana mencionada por varios autores tempranos como Plinio o Vitruvio, que era extraída cerca la ciudad de Tíbur (Tívoli) y probablemente llevada a Roma por barco; las canteras originales no han sido localizadas, y lo más probable, es que hayan desaparecido.

En la misma época se menciona otra roca de construcción, más blanda, llamada *tufo*, cuya descripción parece que se refiere a cenizas volcánicas consolidadas que eran frecuentes alrededor de Roma. El término se exportó hacia el siglo XII a Gran Bretaña, Francia y Alemania, donde fue modificado a toba, reuniéndose bajo esta denominación tanto a ésta como a los travertinos, aunque posteriormente, a comienzos del siglo XIX, se definieron las tobas calcáreas para distinguirlas de las de origen volcánico.

Actualmente, los términos travertino y toba calcárea se aplican a una amplia gama de carbonatos fluviales y lacustres de agua dulce siendo prácticamente sinónimos aunque, estrictamente, el travertino es más resistente y puede ser aserrado y utilizado como piedra de construcción mientras que la toba sería una roca más blanda e inadecuada para el citado uso. La distinción entre travertino y toba se basa principalmente en el grado de cementación, lo que no es fácil de definir en términos de sus límites ni medida. En la estructura del depósito travertínico influyen la tasa de deposición, la mineralogía y el grado de diagénesis pero también la acción de las bacterias y plantas [11].

Desde el punto de vista de su origen, tobas calcáreas y travertinos son depósitos carbonatados continentales generados en condiciones acuáticas. Su presencia y desarrollo está relacionada con acuíferos y aguas carbonatadas y se presentan en diferentes medios sedimentarios, ya sean lacustres, palustres, kársticos o fluviales. Los sistemas resultantes adoptan diferentes morfologías, siendo las más comunes las de manantial, en barreras fluviales y lacustres, cascadas y estromatolitos, aunque la diversidad es muy grande [12].

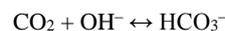
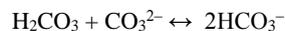
Las aguas naturales contienen cantidades significativas de anhídrido carbónico disuelto que proviene tanto del CO<sub>2</sub> atmosférico con el que está en contacto, como de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. El CO<sub>2</sub> contenido en el agua, que es un ácido de Lewis, la hidroliza liberando protones al medio, de acuerdo con el proceso:



Sin embargo, la principal fuente de bicarbonato en el agua natural no la origina este proceso, sino el lavado de las rocas calcáreas por las que circula. En este lavado, parte del carbonato que contienen se disuelve en el agua, aumentando de forma natural su pH ya que la hidroliza parcialmente originando iones OH<sup>-</sup> según la reacción:

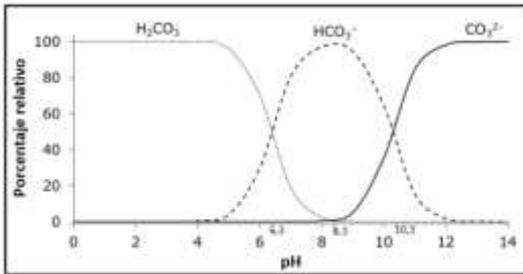


Por tanto, estas reacciones químicas implican equilibrios que tienen lugar entre tres fases: aire, agua y rocas. Además de los mencionados, existen más procesos químicos que conducen a la formación de bicarbonatos, como son los siguientes:



Con carácter prácticamente general, el agua natural va a ser finalmente rica en bicarbonatos ya que todos los equilibrios conducen a su formación. Esta agua va a tener naturaleza ligeramente básica debido a la presencia de más carbonatos en disolución que ácido carbónico, lo que hace que el grado de hidrólisis que genera OH<sup>-</sup> sea superior. De esta forma, las tres especies carbonadas están ligadas por su disociación en agua, mientras que los procesos de hidrólisis implican tanto al carbonato como al ácido carbónico [13].

A partir de las reacciones comentadas es posible expresar las concentraciones relativas de cada especie en equilibrio en función del pH (Figura 1). Si 100 es el valor total de la suma de las tres, la citada figura muestra que por debajo de pH 6,3 predomina el H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, entre pH 6,3 y 10,3 la forma más abundante es HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, mientras que por encima de 10,3 predomina el CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> que se transforma completamente en bicarbonato por debajo de 8,3 [14].

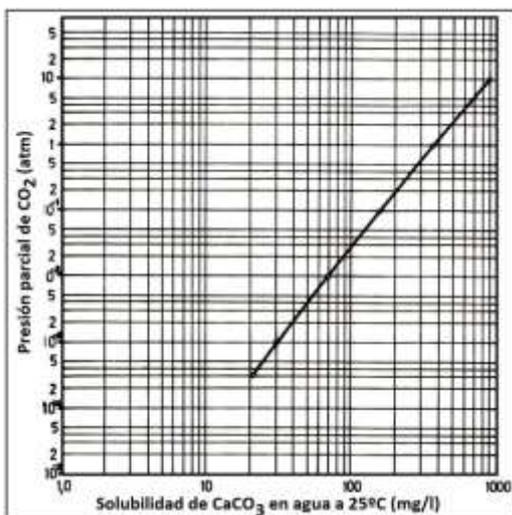


**Figura 1.** Porcentaje relativo de sustancias carbonosas en función del pH (Fuente: [14], modificada)

Las reacciones anteriormente comentadas, en lo que respecta al calcio, suelen condensarse de forma simple en la siguiente, que es como normalmente se encuentra en los textos no especializados:



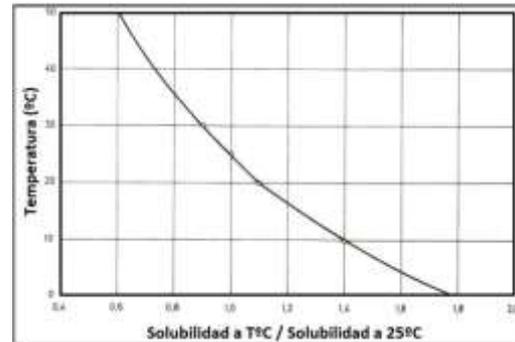
El dióxido de carbono contenido en el agua depende principalmente del que está presente en el aire en contacto con ella. La cantidad de CO<sub>2</sub> disponible en el aire del suelo constituye un factor determinante en todo proceso de disolución de carbonatos. El contenido medio de anhídrido carbónico en el aire atmosférico (tensión de CO<sub>2</sub>), en condiciones naturales, varía entre 10<sup>-4</sup> y 3,3·10<sup>-4</sup> atm según la altitud y latitud pero puede alcanzar valores del orden de 7·10<sup>-4</sup> atm en las zonas urbanas. En el suelo, sin embargo, el valor es mucho mayor, pudiendo alcanzar 0,1 atm aunque es muy variable ya que, además, del tipo de suelo, textura, horizonte, profundidad, drenaje, cobertura vegetal, flora y fauna presentes, influye la duración de los períodos alternativos de las estaciones climáticas. El contenido de CO<sub>2</sub> que presenta el agua en su trayectoria subterránea, desde que penetra en el acuífero hasta que brota por un manantial, y el ambiente en la surgencia, juegan un papel determinante en el proceso de disolución de los carbonatos [15].



**Figura 2.** Solubilidad de carbonato cálcico en agua a 25°C en presencia de CO<sub>2</sub> a diversas presiones parciales (Fuente: [16], modificada)

La solubilidad del carbonato cálcico en agua pura es baja, apenas 14 mg/l. Sin embargo, aumenta sensiblemente a medida que lo hace la concentración de dióxido de carbono (Figura 2), que juega un papel primordial en este proceso. Así, el agua pura saturada con el CO<sub>2</sub> contenido

en el aire puede llegar a disolver de 50 a 75 mg/l de carbonato y, si tiene sales disueltas, hasta 100 o 125 mg/l debido al efecto de fuerza iónica. La solubilidad aumenta más, hasta 250 mg/l, en las aguas que están en equilibrio con el CO<sub>2</sub> del suelo que tenga sustancias orgánicas, y si las aguas reciben aportes extra de CO<sub>2</sub>, puede incrementarse hasta 500 mg/l o más. Por el contrario, al aumentar la temperatura, disminuye la solubilidad del CO<sub>2</sub> (Figura 3) y, con ella, la del carbonato cálcico [16].



**Figura 3.** Efecto de la temperatura en la solubilidad de calita en agua en presencia de una cierta presión parcial de CO<sub>2</sub> (Fuente: [16], modificada)

En conclusión, la disolución del carbonato mejora cuando la temperatura es baja y la presión es elevada (ya que cuanto más profundamente circula el agua, más capacidad de disolución tiene). Por el contrario, la precipitación del carbonato sucede en los siguientes casos:

a) Por desgasificación de CO<sub>2</sub> del agua ocurrida por alguna de las siguientes causas:

- Cuando aumenta la temperatura, por ejemplo, cuando el agua mana a la superficie si la temperatura en ella es superior a la que existe dentro de la roca.
- Cuando se libera CO<sub>2</sub> debido a la agitación de las aguas, por ejemplo, cuando las aguas subterráneas manan borboteando a la superficie o circulan turbulentamente en un río.
- Por evaporación del agua debido a corrientes de aire.
- Por disminución de la presión (las aguas procedentes de grandes profundidades cargadas de bicarbonato cálcico precipitan carbonato mientras ascienden a la superficie o manan en una surgencia).
- Cuando las algas realizan fotosíntesis extrayendo CO<sub>2</sub> del agua.
- Cuando el agua atraviesa sedimentos donde la actividad de los vegetales retiran CO<sub>2</sub>.
- Cuando algunos organismos forman su esqueleto calcáreo liberando CO<sub>2</sub> del agua.

b) Por reacción entre el CO<sub>2</sub> de la atmósfera y aguas subterráneas hiperálcalinas.

c) Por mezcla de aguas subterráneas ricas en Ca con aguas superficiales alcalinas.

d) Por el efecto ion común, por ejemplo, en aguas subterráneas que infiltran evaporitas.

Las condiciones más favorables para la precipitación de los carbonatos se dan en las inmediaciones de las surgencias naturales de las aguas subterráneas. Cuando así ocurre, se originan los travertinos, que se definen como rocas carbonatadas, normalmente de colores pardos, anaranjados o grises, pero también rojizos por contener óxidos de hierro, de estructura muy oquerosa y poco densa, que pueden presentar bandas con distinto porcentaje de huecos y coloraciones. Como en las surgencias de las aguas subterráneas suelen existir poblaciones más o menos importantes de plantas, el carbonato puede precipitar sobre ellas pero también sobre las conchas de moluscos que viven en dichas aguas próximas al manantial, conservándose sus moldes o impresiones. Estos restos calcificados poseen en numerosas ocasiones estructuras concrecionadas y tubiformes. Como ya se ha comentado, algunos autores denominan tobas a las variedades muy porosas y poco compactas de travertinos [10, 17, 18]. La génesis de los travertinos es, pues, similar a la de las estalactitas, estalagmitas y otras acumulaciones de carbonatos procedentes de su precipitación a partir de aguas cálcicas.

Actualmente, la mayoría de los depósitos de travertino se forman por desgasificación del CO<sub>2</sub> de las aguas subterráneas cuando llegan a la superficie y entran en contacto con la atmósfera. En ese caso se produce la última reacción citada actuando en sentido derecha-izquierda, es decir:



El proceso ocurre debido a la menor concentración de CO<sub>2</sub> en el aire y disminución de la presión, lo que provoca la formación de carbonato de calcio, bien como calcita o como aragonito. La reacción inversa corresponde al proceso de disolución de carbonatos debido al CO<sub>2</sub> presente en las aguas subterráneas fenómeno observable en las cavidades kársticas que, con frecuencia son atracciones turísticas por la belleza de sus huecos y espeleotemas creados por la repetición del proceso inicial de precipitación de carbonatos con creación de estalactitas y estalagmitas. El anhídrido carbónico que contienen las aguas puede tener procedencia superficial (de la atmósfera o del suelo) o profunda (procesos en la corteza o bajo ella) [17].

En cuanto a la precipitación biótica, numerosos estudios sobre entornos marinos y terrestres actuales, a partir del registro geológico y a través de experimentos de laboratorio, han demostrado que la precipitación de minerales carbonatados asociada a los tapetes microbianos puede tener lugar en ambientes acuáticos a través de diferentes mecanismos. Dicho tapete está formado por una lámina multicapa compuesta de microorganismos que crecen especialmente en superficies húmedas o sumergidas colonizando ambientes en un amplio rango de temperaturas en los que crean una variada gama de entornos químicos internos. Si forman redes de filamentos, dan consistencia y endurecen el tapete. Los microorganismos pueden alimentarse o tolerar los productos químicos existentes en el medio. En condiciones húmedas, los tapetes se mantienen unidos por sustancias viscosas, las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) excretadas por los propios organismos [19,20], aunque las cianobacterias se

reconocen como los productores de EPS más importantes [21].

Los mecanismos de precipitación de carbonatos en medio acuoso por microorganismos dependen de las condiciones ambientales, de los tipos de comunidades microbianas y de la naturaleza de los sustratos orgánicos. Los carbonatos precipitados puede ser resultado de la actividad metabólica de microbios vivos, o bien, de la mineralización de sustratos orgánicos no vivos con macromoléculas ácidas capaces de unir iones de calcio y magnesio [22].

Los microorganismos inducen precipitación de carbonatos a través de diferentes vías metabólicas, tales como fotosíntesis, ureólisis, amonificación, desnitrificación, reducción de sulfatos, oxidación anaeróbica de sulfuros y oxidación del metano, ya sea aumentando el pH o carbono inorgánico disuelto. Además, la mayoría de las células microbianas proporcionan puntos de nucleación para la formación de carbonatos, especialmente las superficies celulares que constituyen un soporte muy eficaz para la precipitación de dichas sustancias [21].

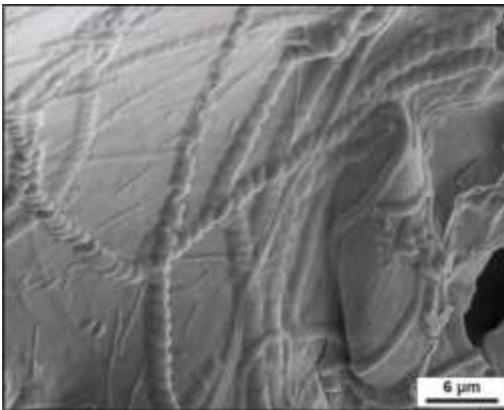
Entre las vías metabólicas microbianas que parecen jugar un papel clave en la precipitación de carbonatos modificando el microambiente e impulsando una mayor alcalinidad y sobresaturación del carbonato, las más significativas parecen ser la fotosíntesis por cianobacterias oxigenadas autótrofas y la amonificación de aminoácidos y reducción de sulfato por bacterias heterótrofas [22]. En realidad, los microbios fotosintéticos, en particular las cianobacterias, son los responsables de las precipitaciones masivas de carbonatos, y así ha ocurrido a lo largo de la historia de la Tierra, como demuestran los estromatolitos cianobacterianos que aparecieron hace 3.500 millones de años. La fotosíntesis conduce a la precipitación de calcita al realizar un proceso de intercambio de HCO<sub>3</sub><sup>3-</sup>/OH<sup>-</sup> a través de la membrana celular, lo que resulta en un aumento del pH en el microambiente alrededor de las células según la reacción [21]:



Por su parte, las EPS tienen un papel clave en la precipitación de carbonatos y otros minerales ya que facilitan la fijación de microorganismos a superficies que conducen a la formación de tapetes microbianos estabilizando las células y protegiéndolas del estrés físico (por ejemplo, de cambios en la salinidad, temperatura, radiación UV, desecación). Estudios recientes en Italia parecen demostrar que el metabolismo microbiano no juega un papel relevante en el control del tipo de precipitados de carbonato. Sin embargo, la precipitación en entornos hidrotermales debida a procesos fisicoquímicos del agua que incrementan la sobresaturación de carbonatos (por ejemplo, la desgasificación del dióxido de carbono), está influenciada por la biopelícula microbiana EPS que actúa como un sustrato de baja energía para la nucleación de cristales, controlando la distribución espacial de los cristales de carbonato e influyendo en los tejidos del travertino. Por lo tanto, la precipitación de carbonatos puede ser inducida por microorganismos y sus vías metabólicas, pero también puede ocurrir sin la contribución de dicho

metabolismo conducida por compuestos orgánicos independientemente de los microorganismos de los que pueden derivar estos compuestos [22].

De todas formas, las contribuciones de los procesos abióticos y bióticos en la deposición de travertino aún no se comprenden bien debido a dificultades técnicas no resueltas. En el estudio de ocho fuentes termales en Japón se encontró que las cianobacterias que secretaban EPS predominaban en la superficie de los travertinos. La calcificación de estas cianobacterias generalmente no tuvo relación con la mayor intensidad del estado de saturación de  $\text{CaCO}_3$  en el medio, aunque ciertamente contribuyeron a crear espacios porosos y atrapar o unir partículas suspendidas. Estas partículas atrapadas por las cianobacterias aumentaron el área de superficie para el crecimiento de cristales para acelerar aún más la precipitación del carbonato. La contribución de la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  inducida por la fotosíntesis fue baja debido a factores como las poblaciones variables de cianobacterias y la inhibición fotosintética de la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ . Las contribuciones promedio de la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  inducida por la fotosíntesis y la precipitación abiótica en las ocho fuentes termales fueron del 16% y 81%, respectivamente, lo que indica el predominio del proceso abiótico para la deposición de travertino [23]. Resultados comparables se habían obtenido unos años antes cuando se midió que la deposición de carbonato de calcio mediante fotosíntesis, evaporación y desgasificación de dióxido de carbono variaba entre el 6 y el 12% para la primera, entre el 10 y el 20% para la segunda y entre el 70 y el 80% para la tercera [24].



**Figura 4.** Precipitado de carbonatos biogénicos (Fuente: [22], modificada)

En comparación con el carbonato de calcio precipitado abióticamente, la morfología y la mineralogía de los formados con la participación de EPS varían enormemente ya que estas sustancias influyen significativamente en la adhesión bacteriana a las superficies de sustrato sólido y, con ella, de los distintos modelos de precipitación de cristales. La calcificación de tapetes y biopelículas dominadas por cianobacterias puede crear costras litificadas gruesas en los lechos de los arroyos y alrededor de nódulos concoides del tamaño de un guijarro. Las propias cianobacterias calcificadas abundan localmente en agua dulce, arroyos y lagos [21]. A título de ejemplo, la Figura 4 muestra una imagen tomada con microscopio electrónico de barrido de una película de EPS que incorpora varios microbios filamentosos

(cianobacterias) y cocoides y cristales prismáticos de calcita.

### 3. Hábitat de las formaciones tobáceas y travertínicas y su protección en la comunidad europea

La formación de tobas calcáreas y travertinos se asocia esencialmente a dos tipos de hábitats:

a) Manantiales con caudales continuos o discontinuos y flujos rezumantes que se ubican en las vertientes de los acuíferos kársticos. El manantial, de agua más o menos saturada en carbonatos, da soporte a un conjunto de formaciones vegetales esencialmente compuestas por musgos adaptados al movimiento del agua. Sobre ellos, y por procesos diversos de índole físico y bioquímica se forma un precipitado de carbonato cálcico, es decir, toba o travertino.

b) Barreras y márgenes en cursos fluviales y ámbitos lacustres por los que circulan aguas prácticamente sobresaturadas en carbonatos y en las que se desarrollan musgos. Sería el caso de los sistemas fluvio-lacustres en donde se desarrollan cascadas en las barreras tobáceas que represan las aguas de los vasos lacustres, o de los cauces fluviales cuyo lecho es recubierto por depósitos calcáreos que colonizan cualquier irregularidad natural o artificial localizada en ellos.

Estos hábitats presentan un especial interés debido a:

a) La convergencia de procesos geológicos, químicos y biológicos en la formación de los depósitos calcáreos.

b) Albergan una comunidad vegetal muy diversa a pesar de su especificidad, dominada por las briofitas, que está acompañada por una fauna también muy específica.

c) Constituir registros geológicos pétreos que contienen restos de flora y fauna que permiten interpretar las condiciones paleoambientales.

d) La elevada fragilidad que presentan y su sensibilidad a la variación de las condiciones ambientales, por lo que pueden ser utilizados como indicadores.

e) Se localizan en numerosas regiones kársticas en muy variados ecosistemas y emplazamientos geomorfológicos

En realidad, las formaciones calcáreas tobáceas y travertínicas se consideran una respuesta sedimentaria de la dinámica kárstica e indicadora de paleoclimas caracterizados por ambientes húmedos y cálidos.

Por su importancia, la Unión Europea ha agrupado estos tipos de hábitat en la Directiva 92/43/CE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres, en un único tipo de hábitat de interés comunitario (THIC) con el código 7220\*, denominado Manantiales petrificantes con formación de tuf (Cratoneurion). El asterisco (\*) añadido al código indica que el hábitat es considerado prioritario por la CE [12].

Una estipulación importante dentro del manual de la directiva de hábitats es que para preservar este hábitat,

de extensión muy limitada en el campo, es esencial preservar su entorno y todo el sistema hidrológico relacionado. Los manantiales de aguas petrificantes dependen de la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. En ella se considera la protección de los ecosistemas terrestres dependientes de las aguas subterráneas existiendo requisitos legales para mantener o mejorar el estado de éstas, con las que se alimentan [25].

#### **4. Velocidad de precipitación. Las aguas petrificadoras**

Una vez salida el agua al exterior, sea a una cavidad o directamente a un espacio abierto, las condiciones imperantes condicionan la precipitación o no de un depósito calcáreo y, de ser el caso, su tipología, que depende en buena medida de la velocidad de precipitación del carbonato.

El que se deposita en cuevas y forma espeleotemas como estalactitas y estalagmitas, lo hace lentamente con una tasa de crecimiento de 0,005 a 0,5 mm/año [26, 27]. Sin embargo, en otras ocasiones, la precipitación se produce a gran velocidad. Así, se han reportado tasas de precipitación de travertino de 5-10 mm de grosor al año en surgencias en California (EE.UU) por las que manaba agua sobresaturada en calcita y dióxido de carbono [28], mientras que en Irlanda se han medido crecimientos mucho mayores comprendidos entre  $9,1 \pm 1,6$  mm/año y  $27,6 \pm 1,9$  mm/año, con un valor medio de  $20,5 \pm 1,1$  mm/año [29], en todos los casos en presencia de materia vegetal, típicamente algas y musgos, que parecen formar hábitats específicos en las citadas aguas; de hecho algunas especies son indicadores de alta calidad de la presencia de manantiales de aguas petrificantes [25]. En base a estos datos, una precipitación de 20 mm/año supone que, en promedio, cada mes se depositan 1,67 mm de carbonato sobre una roca, planta u objeto, lo que es suficiente para cubrirlo con un revestimiento que oculte el material original. Actualmente, en alguno de estos lugares de rápida precipitación, como Knarborough, Inglaterra, el agua puede depositar una costra calcárea sobre un objeto en 3-5 meses [30]. El sitio es conocido desde 1538 y considerado atracción turística desde 1630 hasta nuestros días en que los visitantes cuelgan objetos para que los chorros de agua los mojen y precipiten una película de carbonato cálcico (Fotografía 1); incluso con estos objetos se ha creado un pequeño museo [31].

Un fenómeno petrificador semejante puede observarse actualmente en algunos lugares de Huancavelica (Perú), en los que el agua que cae en el frente de una cascada de travertino empapando la vegetación herbácea allí existente, crea en poco tiempo una costra calcárea de crecimiento concéntrico que las recubre. Se desconoce la tasa de crecimiento pero, indudablemente, es muy rápida.



**Fotografía 1.** Objetos sometidos a petrificación  
(Fuente: [32])

Precisamente, los fenómenos de petrificación en esta localidad se conocen desde principios de la época virreinal, época en la que a los españoles les llamó la atención la rápida formación de travertino, que se usó posterior y extensivamente, troceado, como ladrillo en la construcción. También les sorprendió la precipitación de carbonato sobre elementos orgánicos, puesto que se producía de una manera rápida y visible a la escala de tiempos humana. Lo particular del caso es que, al ser Huancavelica una ciudad colonial muy importante por su producción de mercurio para amalgamar los minerales de plata obtenidos en el Cerro Rico de Potosí y otros lugares del virreinato del Perú, era visitada con frecuencia por personas más o menos ilustradas que dejaron repetida constancia de este fenómeno natural.

#### **5. Las aguas petrificadoras de Huancavelica** **5.1. El acuífero calcáreo y los manantiales**

Las aguas petrificadoras de Huancavelica deben su contenido en carbonato la Formación Chúlec de edad cretácica (Aptiense). A muro de ella se encuentra la Formación Chayllacatana formada por lavas de diversos tipos y colores fácilmente meteorizables, cuya edad es cretácica (Neocomiano superior). Al muro de ésta se encuentra el Grupo Goyllarisquizga, compuesto areniscas con intercalaciones de arcillas, de edad Neocomiano. Sobre la Formación Chulec existe un hiato sedimentario aunque en la zona frecuentemente se encuentra la Formación Casapalca, que son arcillas con intercalaciones de conglomerados y areniscas de edad Oligoceno [33]. Estas formaciones, en la zona en estudio, se disponen en bandas orientadas de norte a sur y son atravesadas perpendicularmente por el río Ichu, en cuyo aluvial se sitúa la ciudad de Huancavelica (Figura 5). La erosión producida por el río, el elevado buzamiento de los estratos, la repetición de la serie estratigráfica por fenómenos tectónicos y la presencia de numerosas fracturas, facilita que el agua subterránea contenida en la Formación Chulec aflore en superficie en diversos lugares dando lugar a importantes travertinos. En la citada figura se muestra un plano geológico parcial de la zona ocupada por travertinos en el que se han destacado la presencia de éstos, la ocurrencia de la Formación Chulec y cinco afloramientos singulares en los que apreciar el efecto del agua carbonatada en el entorno de su surgencia.

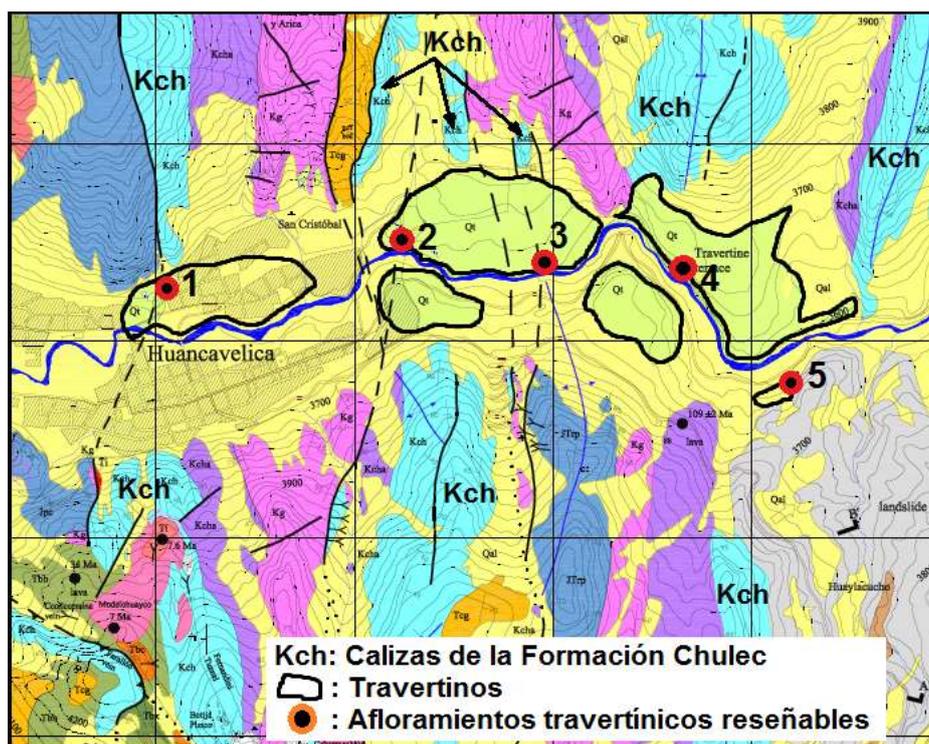


Figura 5. Mapa geológico de Huancavelica con indicación del yacimiento de travertino (Fuente: Autor basado en [34])

El manantial más conocido es el que ha dado lugar al muy frecuentado complejo turístico de los baños termales de San Cristóbal (ver Figura 5, -1-), situados en pleno casco urbano, cuyas aguas termales se explotan actualmente en piscinas y baños privados. Las aguas excedentes se vierten al río. Estas aguas manan en el contacto entre la Formación Chulec y los terrenos cuaternarios, por una fractura (Fotografía 2); han dado lugar a potentes masas de travertinos que, localmente, han sido explotados desde la época virreinal para ser utilizados, convenientemente cortados en forma de ladrillos, en la construcción de edificios. Es la denominada piedra termal, canchaya o calcanía. Sin embargo, el avance de la trama urbana actual ha cubierto estas masas calcáreas que hoy sólo son claramente visibles en las excavaciones de solares y cimentaciones dentro del casco urbano próximo al manantial (Fotografía 3) y en el auditorio subterráneo de la plaza de San Cristóbal, cuyas paredes están excavadas en la propia piedra termal. Adoquines y bloques de esta roca se pueden ver en multitud de tapias y muros de la ciudad [33].

Los restos visibles sugieren que el yacimiento de travertino, morfológicamente, constituye una cascada. Las referencias históricas a este manantial son las más abundantes pues el material calcáreo que se extrajo en sus inmediaciones constituyó un elemento constructivo de la máxima importancia desde el mismo momento de creación del asentamiento minero en 1564 (Fotografía 4), como constata la opinión del historiador peruano Guillermo Lohmann:

*Bien pronto se trazaron calles con regularidad y de anchura proporcionada; al principio, los edificios fueron humildes, relativamente achaparrados y cubiertos de paja, excepto el Almacén real, que tenía tejado. Para estas construcciones se disfrutó de la facilidad de disponer, al otro lado del arroyo*

*Siquisichaca (actual río Ichu), de una cantera excelente (San Cristóbal). En efecto, un raudal de agua caliente que allí brotaba, y al cual se atribuían virtudes terapéuticas, a poco de fluir se lapidificaba, en forma de una roca porosa, muy blanda para labrar y cortar a la medida deseada. Con ella se construyeron casi todas las casas; tenía un hermoso color azafranado [35].*



Fotografía 2. Manantial de San Cristóbal (Fuente: Autor)

En la Figura 6 se muestra un detalle de la vista general de Huancavelica dibujada el 12 de febrero de 1790. Este plano se ha dibujado la extensión aproximada del yacimiento travertínico, separado de la ciudad por el río Ichu, la posición probable del manantial y la situación de las explotaciones de travertino para la fabricación de ladrillos, perfectamente delimitadas en varias parcelas, junto al entonces barrio de San Cristóbal. En la época virreinal, aunque algunas personas opinaban que las aguas de San Cristóbal eran de mala calidad para su uso humano, otros no tardaron en darse cuenta de los



**Fotografía 3.** Travertino en un solar de Huancavelica  
(Fuente: Autor)

beneficios que proporcionaba bañarse en ellas. Una de estas personas fue Juan Antonio Díaz que, hacia 1788, se propuso construir a su costa unos baños que pudiesen ser usados de forma regular por las gentes

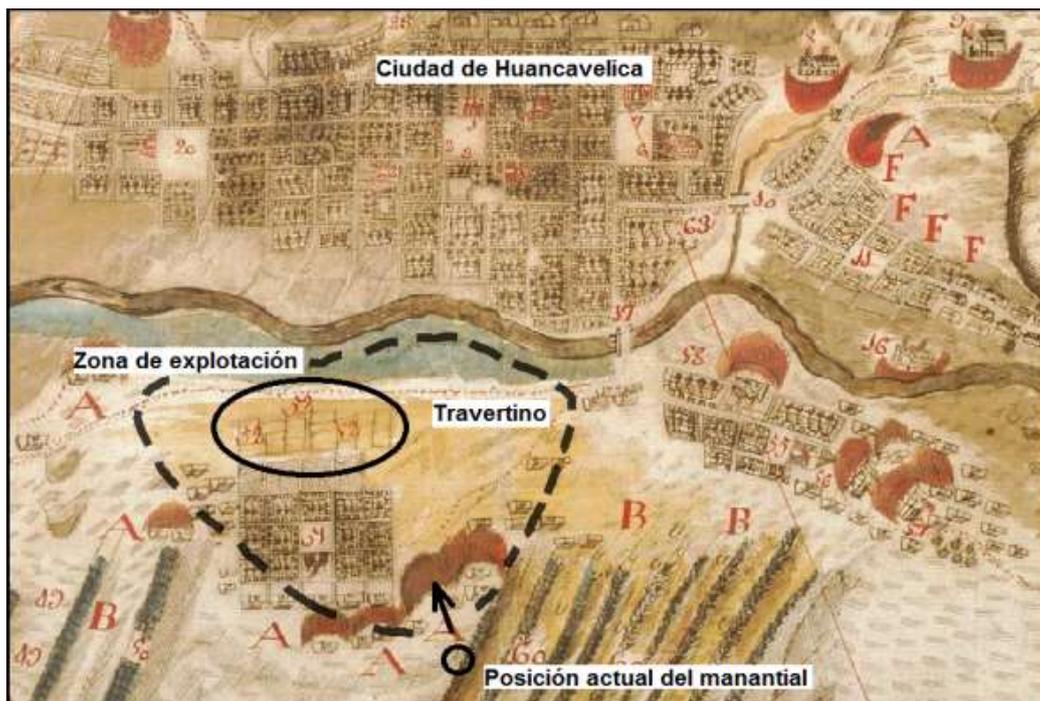
de la ciudad, destinando los beneficios económicos que rindieran a costear los gastos del culto del Santísimo Sacramento [36].



**Fotografía 4.** Casa de la época virreinal construida con piedra termal (Fuente: Autor)

El periódico Mercurio Peruano comentaba elogiosamente dicha noticia en 1791 describiendo los baños de la siguiente forma:

*Hállanse situados inmediatos a la población. Constan de dos piezas edificadas con arte. Cada una tiene sus puertas y ventanas de reja, hechas de la madera llamada vulgarmente casi, que es incorruptible, y adornadas con su cortinaje de lienzo*



**Figura 6.** Explotación de travertino en 1790 (Fuente: [36], modificada)

delgado a fin de que sirvan de obstáculo al aire sin impedir la luz. En su pavimento se han formado unas tinas de fuerte argamasa capaces de contener un hombre sentado con toda comodidad y llegarle el agua hasta los hombros. Ésta se origina de unos veneros que corren por sobre vetas de hierro. Así, por la disposición del terreno como en especial por la curiosidad con que se han fabricado los cuartos, se consigue que estando uno superior al otro, la tina del primero reciba las vertientes en su plan, de donde corriendo el agua a la segunda más inferior, y que dista alguna varas, le entra por el borde haciendo un salto a fin de que golpee, si fuere necesario, sobre el cuerpo que hubiere de usar los referidos baños. Su temple es agradable gozando de un moderado calor, y tan expedito su curso que pueden renovarse al arbitrio propio sin temor de que se estanque la menor porción de agua.

Seguidamente el periódico ponderaba los beneficios de las aguas, destacando su contenido ferruginoso cuyo uso en medicina se reputaba muy útil para vigorizar el organismo y recuperar su salud. Las aguas debían emplearse en los mismos manantiales, como era el caso, ya que *conducidas a lugares distantes se disipan, a pesar de las mayores precauciones. Hay casos en que, o por la dureza de los tumores o por la suma inercia de las partes, no es suficiente la simple ablución: se necesita dar ímpetu al agua para que con el choque desbarate aquellos o irrite y avive éstas.*

Finalmente, el artículo citaba nominalmente las muchas personas que habían curado sus dolencias con baños en San Cristóbal, dolencias tan variadas que las aguas parecían tener propiedades casi milagrosas [37].

Desde el punto de vista científico, el conocimiento de las características de las aguas de los baños de San Cristóbal se debe al análisis que de ellas realizó el naturalista Antonio Raimondi cuando visitó Huancavelica en 1862 [38]. Tras el fallecimiento del naturalista en 1890, sus notas sobre la calidad de estos baños se publicaron en 1902, señalando lo siguiente:

*En la misma margen izquierda del río, en la parroquia de San Cristóbal, existe el baño termal del mismo nombre. Este baño consiste en una grande poza de forma rectangular, de 28 metros de largo por 16 de ancho, construida de cal y piedra. En la misma poza, en la parte que mira hacia el norte, hay un ojo de agua termal muy cristalina, que tiene la temperatura de 28,8°C, siendo la del aire, en el momento de la observación, de 12°C. El agua de este baño es poco mineralizada, pues la cantidad de materias fijas que contiene no alcanzará a un gramo por litro, pero la temperatura del agua es tan agradable, que este baño es muy concurrido por los habitantes de Huancavelica [38].*

Los resultados del análisis químico realizado por Raimondi se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Análisis químico de las aguas de los baños de San Cristóbal (Fuente: [38])

COMPONENTE QUÍMICO	CONTENIDO (mg/l)
Carbonato cálcico	75,0
Carbonato magnésico	25,0
Óxido de hierro	2,5
Sulfato cálcico	312,8

Sulfato magnésico	75,6
Cloruro magnésico	117,7
Cloruro sódico	264,2
Potasa y litina	Cantidad sensible
TOTAL	872,8

En ese mismo viaje Raimondi dejó dibujado un mapa de Huancavelica que incluía los baños de San Cristóbal en la misma exacta posición que hoy ocupan. Entonces la instalación tenía una superficie total aproximada de 50 x 25 m y estaba completamente aislada del resto de los edificios de la ciudad [39]. Al parecer ya habían desaparecido las dos tinas construidas por Juan Antonio Díaz en 1791.

En la actualidad, el complejo San Cristóbal dispone de dos piscinas, una para niños y otra para adultos, así como de diez pozas termales más pequeñas que pueden usar personas individuales o pequeños grupos que constituyen, en sí, el mayor atractivo del complejo. El agua se caracteriza por tener alto contenido de azufre, olor que se extiende por los alrededores de las piscinas, y es ferruginosa, dejando pátinas marrones en las piscinas que periódicamente hay que limpiar. El agua de baño está a una temperatura que varía de 18 a 22°C y es apta para el tratamiento de problemas cutáneos y el estrés [40]. Puesto que la temperatura media de Huancavelica es de 9,2°C [41], de acuerdo con la normativa española, el agua es termal ya que su temperatura supera en más de 4°C la del lugar donde alumbra [42].

El siguiente manantial en dirección al Este (ver Figura 5, -2-) es una surgencia igualmente ligada a una fractura. El agua es objeto de aprovechamiento mediante una pequeña instalación balnearia con dos piscinas, denominada Baños del Inca [33]. En ella es visible la existencia de piedra termal que aflora en lo que parece ser el frente de una formación travertínica dispuesta en cascada (Fotografía 5) de la que brota el manantial 3.



**Fotografía 5.** Frente de cascada travertínica en los Baños del Inca (Fuente: Autor)

El manantial siguiente hacia el Este surge de la misma cascada travertínica que el anterior (ver Figura 5, -3-). Esta colada, en la parte distal, junto al río Ichu, está fracturada en un karst superficial (Fotografía 6) dentro del cual se está formando un travertino secundario (Fotografía 7). Por tanto, desde el punto de vista geológico, se trata de un fenómeno triple que sucesivamente ha originado un depósito de travertino (cascada) que ha sido erosionado (karst) y dentro del cual se está produciendo una nueva precipitación de

**Enrique Orche García**

travertino. La belleza del lugar y la surgencia de agua han permitido que ambos sean aprovechados mediante el Complejo ecoturístico de Seqsachaca Villa Cariño. Ubicado en el espacio kárstico roto formado por los grandes bloques fracturados de la cascada primitiva, parte de cuya estructura fue disuelta por el agua, constituye un laberinto de pasadizos que ascienden y descienden (Fotografía 8), complicados por el depósito de masas de travertino secundario que ocupa los lugares más insospechados. Las aguas ferruginosas son embalsadas en diversas pequeñas pozas que están acondicionadas para el baño. El Complejo ocupa una superficie de 4 ha y ha sido recientemente reformado introduciendo numerosos elementos artificiales [33].

El manantial 4 ha ocasionado una colada secundaria que emerge del frente de la potente cascada principal travertínica situada a oriente de la anteriormente citada (ver Figura 5, -4-). La surgencia es perfectamente visible así como la morfología del precipitado cuya frente alcanza el cauce del río Ichu, drenaje general de todo el sistema (Fotografías 9 y 10). El frente de la colada secundaria está colonizado por vegetación briofita, lo que indica la presencia de agua y la actividad del mismo.



**Fotografía 6.** Karst y travertino de Seqsachaca Villa Cariño (Fuente: Autor)



**Fotografía 7.** Travertino de Seqsachaca Villa Cariño (Fuente: Autor)

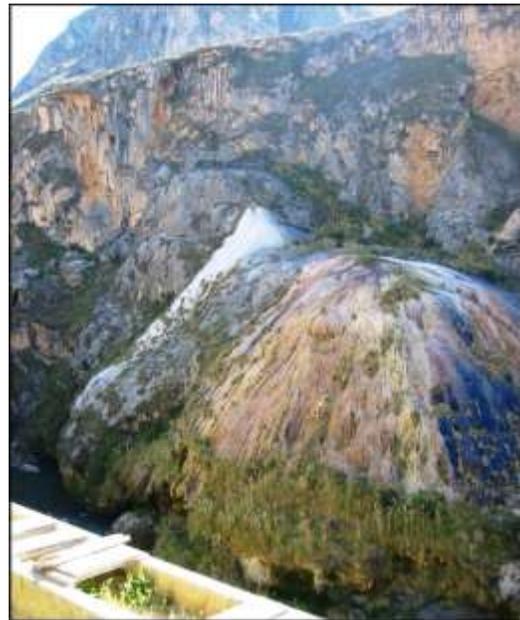


**Fotografía 8.** Pasadizos en el karst de Seqsachaca Villa Cariño (Fuente: Autor)



**Fotografía 9.** Colada travertínica principal y secundaria manantial 4 (Fuente: Autor)

Finalmente, el manantial 5 (ver Figura 5, -5-) es el único de los considerados que está ubicado en la orilla meridional del río Ichu. Se trata de un travertino recubierto por sedimentos de aluvión que



**Fotografía 10.** Detalle de la colada travertínica principal y secundaria manantial 4 (Fuente: Autor)



**Fotografía 11.** Frente del manantial petrificador 5  
(Fuente: Autor)



**Fotografía 12.** Petrificaciones manantial 5 (Fuente: Autor)

es alimentado por agua de la Formación Chulec que aflora más al sur. Constituye el pequeño frente activo de una colada en la que es posible apreciar la petrificación de los vegetales a través o por encima de los cuales desagua el manantial. Es un fenómeno poco frecuente por la rapidez con que se produce, por lo que su presencia resulta llamativa, especialmente por situarse en el borde de la carretera que conduce a Huancayo, principal acceso a Huancavelica.

Si las aguas de San Cristóbal son, como se comenta en el apartado siguiente, el paradigma de la formación de piedra termal, este manantial lo es en lo relativo a las petrificaciones rápidas (Fotografías 11 y 12). La facilidad de acceso añade interés por este punto geológico singular que permite apreciar la precipitación de carbonato en breve periodo de tiempo.

## 5.2. Testimonios históricos sobre la petrificación

Los testimonios sobre las propiedades de las aguas petrificadoras de Huancavelica son numerosos. La mayor parte de ellos se limita a comentar tan sorprendente singularidad, aunque algunos ilustrados se aventuraron a proponer las causas de la misma, elaborando teorías más o menos cercanas a la realidad.

Apenas 25 años después de la fundación de Huancavelica como asentamiento minero en 1564, el intelectual y observador jesuita José de Acosta ya daba cuenta en 1590 de dichas aguas:

*Como en otras partes del mundo, así en las Indias hay gran diversidad de manantiales y fuentes y ríos, y algunos de propiedades extrañas. En Huancavelica del Perú, donde están las minas de azogue, hay una fuente que mana agua caliente, y como va manando el agua se va convirtiendo en peña. De esta peña o piedra tienen edificadas casi todas las casas de aquel pueblo. Es piedra blanda y suave de cortar, y con hierro la cortan y labran con la facilidad que si fuese madera, y es liviana y durable. De esta agua, si beben hombres o animales, mueren, porque se les congela en el vientre y se hace piedra, y así han muerto algunos caballos. Como se va convirtiendo en piedra, el agua que va manando tapa el camino a las demás, y así es forzoso mudar la corriente, por lo cual mana por diversas partes como va creciendo la peña [43].*

En este texto se citan las características más sobresalientes del travertino huancavelicano desde el punto de vista constructivo, destacándose su facilidad de corte y ligereza, propiedades que extendieron el uso de esta roca en la construcción de edificios. Se explican también el mal causado a los animales que ingerían el agua petrificadora y las razones que justificaban la multiplicidad de las fuentes existentes.

De 1591 es el testimonio del médico Juan de Cárdenas que relata lo siguiente:

*También lleva camino de haber fuentes dentro de las cuales, por transcurso del tiempo se convierte en piedra lo que en ellas echan [...], y realmente se ha de presumir que tiene consigo tanta grosedad y mezcla de parte terrestres esta agua que, comunicándolas e incorporándolas con la misma cosa que dentro de ellas echan, las endurece y convierte en piedra, y no digo yo a lo que en ella echa pero ella misma se suele convertir en piedra, como se cuenta del agua de aquella fuente que en los reinos del Perú, junto a Huancavelica se ve y sabe de muchos que la han visto, en que acabándola de sacar del río, se convierte en una blanca y dura piedra, que siendo real y verdaderamente agua, lo sutil se exhala y evapora con gran facilidad y se convierte lo demás en piedra [44].*

El capitán Bernardo de Vargas Machuca, en 1599, cita de nuevo la calidad petrificadora de estas aguas [46]. En 1603, Diego de Ávalos informa de que casi todas las casas de Huancavelica estaban fabricadas con esta roca (Fotografía 13) y que haciendo en la tierra una señal y dejándola llena de agua, en unos días el líquido se transformaba en piedra [47].

En 1621 Andrés de León se maravillaba de las petrificaciones y describía una boca secundaria del manantial que, en 30 años, había levantado un pequeño cerro en lo que anteriormente era una llanura, acumulando capa sobre capa:

*Vio un manantial muy grande que en aquel sitio tiene su nacimiento, un tiro de mosquete del lugar, el cual es de agua tan caliente que causa admiración. Sirveles a los vecinos de un regaladísimo baño y tiene el agua un efecto nunca visto ni oído jamás en ninguna historia de ninguna fuente ni río de cuantos hay en el mundo, y es que el agua que sale del manantial, así como empieza a correr, se va helando y convirtiéndose en piedra. Averiguase esta verdad con que, habiendo salido este manantial de treinta años a esta parte y siendo su sitio un llano, se ha levantado un cerro a la*

### Enrique Orche García

*redonda de piedra del agua que sale, la cual, en toda aquella parte que se detiene hasta llegar a un río que pasa muy cerca de la fuente, va creciendo una capa sobre otra como se va helando y se convierte en piedra, la cual viene a servir en la villa, así para los edificios de los templos como para las casas. Es la piedra tosca y ligera, pero sirve y es de provecho para la villa [48].*



**Fotografía 13.** Casa construida con piedra termal  
(Fuente: Autor)

Nuevas precisiones aunque no por conocimiento directo, fueron realizadas por el agustino Antonio de la Calancha en 1638, quien dudaba de la rápida conversión de agua en piedra aseverando lo siguiente:

*Lo que tantos autores dicen que hay un agua en Huancavelica que dentro de veinticuatro horas se convierte en piedra de la que están hechas las casas, y que no hay sino que hacer en molde de madera las labores y que sale al otro día figurada la piedra es engaño, y será sólo verdad que con el tiempo, y corriendo años, se va criando del agua (que es mala y gruesa) piedra que, cortándola, sirve de lo que las comunes y admite pico y cincel y se puede labrar como otras que hay para este efecto [49].*

De esta misma época es el testimonio del sacerdote y experto metalurgista asentado en Potosí, Álvaro Alonso Barba, autor del célebre tratado *Arte de los metales*, publicado en 1640, de amplia difusión y repercusión en Europa. Alonso siguiendo las ideas de Avicena en lo que respecta al origen de las piedras, hacía la siguiente referencia al agua petrificante de Huancavelica tratando de explicar su origen de forma científica:

*Es su materia próxima [...] una mezcla de tierra y agua, que si tiene más agua que tierra se llama jugo, y si más tierra que agua, lo llamamos lodo. Ha de ser viscoso y tenaz el lodo que hubiere de servir en la generación de las piedras, como lo es con el que se hacen los ladrillos, ollas y otros vasos, porque de no serlo, evaporada la humedad con el calor, no quedará unida sino hecha polvo y tierra la materia. Es también necesaria cosa que el jugo que se ha de convertir en piedra sea viscoso, como se experimenta en nuestros cuerpos; pues es sentencia común entre los médicos que se engendra la piedra en los riñones y vejiga de humores viscosos y tenaces, y cocidos del calor interior. Llena está sin duda de este jugo petrífico aquel agua tan nombrada de este reino que corre cerca de Huancavelica y se recoge en moldes de la grandeza y fama que se quiere, y a pocos días*

*que el calor del sol la labra, la convierte y cuaja en piedra de que se fabrican los edificios (Fotografía 14). Mueren los animales que la beben y no es dificultoso el conocimiento de su causa [6].*



**Fotografía 14.** Portada colonial construida en piedra termal  
(Fuente: Autor)

Más adelante, Alonso explica la razón para que unas piedras sean más duras y porosas que otras, lo que puede aplicarse al travertino huancavelicano:

*Si la materia en la composición de las piedras es tenaz y el calor que las deseca grande, y que destruye de ella la humedad, se causa la dureza, porque se aprieta y condensa en sí misma la materia; [...] también el frío, cerrando y condensando la materia es causa de la dureza que se halla en las piedras, que con él se cuajan, y éstas son las que se derriten al fuego porque con él se desata y corre el humor que dentro de ellas estaba congelado. [...] Son porosas algunas piedras y muy macizas y bien amasadas otras: proviene lo primero de no haberse mezclado igualmente y bien la parte húmedas con la terrestre, y así, exhalando después con el calor el agua en las partes que no tenían mezcla de tierra bastante a defenderlas de su violencia, quedan aquellos vacíos o poros que hacen a las piedras esponjosas como por la causa opuesta sucede lo contrario en las macizas [6].*

Respecto de los fósiles u otros animales o plantas recubiertos por caliza, Alonso distinguía unos de otros aunque desconocía la causa de la petrificación:

*Cuando se hallan piedras que representan animales o sus partes o pedazos de plantas u otras cosas corporalmente por relieve y no por dibujo sólo, puede ser la causa la que ya queda dicha del jugo petrífico, que embebiéndose en sus poros, lo convirtió todo en piedra. [...] Pero aunque algunas veces se pueda atribuir a esto, no parece que se pueda hacer siempre con fundamento bastante [6].*

Seguidamente Alonso refería algunos lugares en donde se habían encontrado animales petrificados, que son fósiles evidentemente, sin que pudiera encontrar explicación sobre cómo se formaron. Cuando eran similares a conchas marinas y se localizaban en terrenos montañosos, aducía que era de locos pensar que allí hubiera habido mar alguna vez, sin que el brillante metalúrgico fuera capaz de aportar una solución que explicase el fenómeno. Para ello aún quedaba mucho tiempo.

En 1656, Antonio de León Pinelo vuelve a citar las propiedades petrificadoras del agua huancavelicana sin añadir nuevas precisiones [7].

Las peculiaridades de las aguas minerales de Huancavelica llegaron a Europa, siendo conocidas al menos desde comienzos del siglo XVIII gracias a la descripción hecha por el ingeniero y oficial de la marina francesa M. Freizier. Enviado por el rey de Francia, entre 1712 y 1714 reconoció la costa del Pacífico y estudió las costumbres de sus gentes. Cuando en 1716 publicó sus impresiones (reeditadas en 1732), Freizier se refería a las aguas de Huancavelica en estos términos:

*Se ve en esta ciudad (Huancavelica) una otra particularidad; es una fuente cuya agua se petrifica tan fácilmente y tan prontamente que la mayor parte de las casas de la ciudad han sido construidas con estas piedras. Es en la margen izquierda del río que baña la ciudad de Huancavelica, que se nota un gran número de manantiales de agua calcárea, los que han formado un inmenso depósito de una especie de toba de color blanquizco ó amarillento. Este depósito tiene muchos metros de espesor, y se extiende desde el puente de Huancavelica hasta una legua más abajo. Los ojos de agua mineral forman como una serie a lo largo del río, y el agua de algunos de ellos es ligeramente ferruginosa pues la materia calcárea depositada varía de color, habiendo partes blancuzcas, otras de color amarillento y algunos trozos con rayas alternadas blancuzcas y amarillentas; de lo que se podría deducir que el agua de un mismo manantial ha cambiado de naturaleza en distintas épocas. Este depósito de materia caliza ofrece grietas y grandes cavidades a manera de cuevas, y sirve como de cantera pues se corta en masas rectangulares del tamaño de grandes adobes, que sirven como piedras de construcción [50] (Fotografía 15).*

Esta descripción refleja exactamente la naturaleza del travertino de Huancavelica y podría ser adoptada por cualquier estudio geológico moderno: por primera vez cita que es una toba y señala que el agua es ferruginosa. La extensión que atribuye a los depósitos travertínicos es algo superior a la que se presenta en la Figura 5, ampliándola hacia el este. En cuanto a las piedras de construcción que cita el autor, son fácilmente visibles hoy día en la ciudad. En el último párrafo, el francés describe sin duda el karst existente en Seqsachaca Villa Cariño (ver Figura 5, -3-).



**Fotografía 15.** Restos del muro colonial de travertino (Fuente: Autor)

En 1741, el misionero jesuita José Gumilla hizo una nueva referencia a las aguas de Huancavelica. En su obra *El Orinoco Ilustrado*, que se publicó cuatro veces en el siglo XVIII, en la edición de 1745 comentaba lo siguiente en relación con dichas aguas y las similares existentes en las proximidades de Quito y Popayán:

*El agua de Huancavelica, mina del Perú, se saca del arroyo, se echa en moldes de la figura que se quiere, y se cuaja en piedra de sillería, según fueren los moldes; y de la tal cantería se fabrican las casas. [...] Dos célebres caleras, la de Tanlagua, que dista de la ciudad de Quito nueve leguas, y la de Coccoñuto, que dista de Popayán ocho leguas, [...] son dos manantiales, cuyas aguas se congelan en piedras de cal, de modo, que si estas caleras estuvieran cerca de Huancavelica, se viera una gran maravilla, pues fueran sus paredes de cal y canto, y de ellas con verdad se podría afirmar, que poco antes fueron agua corriente [8].*

En 1748 Antonio de Ulloa, en su *Viaje a la América meridional*, trata de las aguas petrificadoras de las inmediaciones de Quito pero no de las de Huancavelica, tal vez por no haber visitado aún la villa. Sin embargo, nombrado director de la mina de mercurio en 1757, permaneció allí hasta 1764, lo que le dio oportunidad de conocer profundamente la naturaleza de las aguas mineralizadas que describe posteriormente en sus *Noticias Americanas*, publicada en 1772. Sus primeras e interesantes opiniones sobre el proceso de precipitación calcárea en Quito, que son perfectamente aplicables a las surgencias huancavelicanas, datan de 1748 y parecen estar escritas específicamente sobre el manantial petrificador 4 de la Figura 5:

*Hacia la parte del norte de Quito [...] pasa un río muy grande, el cual petrifica todo lo que cae dentro siendo cosas de madera, como hojas de árboles u otras especies de fácil corrupción. Yo he tenido ramas enteras hechas piedra donde, además de señalarse la porosidad de los troncos y fibrazón de la madera y cortezas, se percibían en la hoja todas sus partes, hasta las venas más pequeñas y trabazón de sus fibras, lo mismo que pudiera distinguirse en la hoja verde acabada de cortar el árbol; al respecto de éstas, he tenido grandes pedazos de madera petrificados que, a la primera vista, antes de tocarlos, parecían madera muy seca porque sólo el color había variado en ellos.*

*Con todas estas señales, no me puedo persuadir a que la misma madera, hoja y otras cosas semejantes metidas en este río se conviertan en piedra, quedando de una dureza tal como la que se ve; y siendo innegable el hecho, es preciso dar alguna salida a esta transmutación. Para ello, supongo, como allí se advierte, que las mismas peñas que lava el río con sus aguas, y todo lo que estas mojan, se halla cubierto por una costra tan dura o poco menos que la misma piedra principal, y con ella se aumenta su primer volumen distinguiéndose el adquirido del primitivo en el color pues el sobrepuesto amarillea alguna cosa; de esto podemos inferir que las aguas del río están mezcladas con algunas materias o partes muy sutiles, petrificantes, viscosas y pegajosas, las cuales se unen con la pieza que circundan y, al paso que se van introduciendo con su mucha sutileza por los poros de ellas, van ocupando el lugar de la fibrazón, que la misma humedad pudre y deshace poco a poco hasta que, por fin,*

queda todo lo que fue hoja o palo consolidado de aquella materia petrificativa e impresas en ella las partes de la primera con la señal de fibras y de venas porque, al mismo tiempo de introducirse, sirviéndose sus conductos como de una especie de molde, va tomando su figura. Una especulación hecha con algunas ramas me comprobó este dictamen y fue que, habiéndolas partido, hubo algunas hojas y palillos que saltaron al quebrarlos, y lo interior estaba tan sólido y duro como verdaderamente piedra, sin más accidente de su primitiva sustancia que el de su estructura; pero en otras saltaba lo que ya estaba consolidado de la materia pedregosa, y las fibras que no habían tenido bastante tiempo para hacer una total corrupción se distinguían todavía a la vista de madera, unas más podridas y deshechas que otras; algunas hojas hubo que sólo lo exterior tenían una muy delicada y tenue telilla de la materia nueva y en lo interior se conservaban enteras y, por algunas partes, empezadas a deshacer con la corrupción.

Asimismo es de notar que esta materia se pega y une con más facilidad a todo lo corruptible que a lo de mayor consistencia, como las piedras, y no hay duda que la razón de ello sea el hallar en la una poros donde, introduciéndose, puede quedar fija y, no encontrándolos en la otra aquella que se pegó, la lava y desune el continuo batidero o corriente de agua, con que no tiene lugar de aumentarse como en las cosas porosas; así, aunque en las piedras se ven algunas costras, nunca llegan éstas a aumentar sensiblemente su grandor, no obstante que la diferencia del color lo haga percibir algún tanto; el que tienen las hojas petrificadas tanto en lo exterior como por adentro es blancuzco algo amarillento, y lo mismo los troncos aunque en éstos tira siempre alguna cosa al que tiene el mismo palo cuando seco [9].

Un testimonio de extraordinario interés es el del franciscano José Torrubia en su *Aparato para la Historia Natural Española* de 1754, teniendo en cuenta que esta obra puede considerarse el primer tratado paleontológico de España. Torrubia hace referencia a los trabajos de Gumilla (1745) y de Ulloa (1748), confundiendo los fósiles con las petrificaciones recientes, aunque ya anticipa que corresponden a animales marinos verdaderos. Como no podía ser menos, cita el caso de Huancavelica en los siguientes términos, distinguiendo dos tipos de formaciones travertínicas:

*Al norte de esta villa está un montezuelo llamado Potoche, del que nace un agua tibia que muda en piedra todo cuanto toca (San Cristóbal). Aquellos ramitos o hierbas de sus márgenes que el agua salpica, se van cubriendo de piedra con la misma disposición que sucede cuando una almendra se confita, de suerte que un palito de una línea, con el sucesivo beneficio llega a encostrarse y hacerse una piedra de grande mole. Me ha colmado por su dignación de estas preciosidades el Señor Don Jerónimo de Sola, del Consejo de su Majestad en el Supremo de Indias, que vivió en Huancavelica trece años, donde con su notorio instruido ingenio hizo sólidas y muy críticas observaciones sobre este fenómeno. Una es (y hace mucho a nuestro caso) que las petrificaciones que se hallan en la parte septentrional, todas son porosas y de color obscuro; al contrario las que se observan en la meridional, que son blancas, y de especial solidez. De unas y otras piezas tengo en mi poder, y con unas*

*y otras se comprueba el sistema que sigo. De suerte que en la una parte del montezuelo de Huancavelica administra la tierra partes de la primera especie, que con el vehículo del agua se reducen a piedras sólidas y blancas, y en la parte opuesta combina solo moléculas irregulares de la especie segunda, formando de ellas cuerpos oscuros y porosos [51].*

Siguiendo a Lancisi y a Mercati, y considerando los hallazgos de La Hire en las rocas de una cantera, el fraile explicaba así el origen de las petrificaciones:

*Todo esto que sucede en las encostraciones conspira a persuadir que el agua jamás disuelve aquellas particillas o moléculas que saca de la tierra. Lo que hace es mantenerlas como en infusión hasta que oportunamente se combinan por sus principios unas y otras en pasta blanda. Después, evaporada totalmente el agua de entre ellas, éstas por su naturaleza y viscosidad no sólo forman figura y consistencia de piedra, sino que si acaso algún cuerpo extraño cayó en su centro, también lo hacen piedra y allí lo conservan eternamente preso. [...] A aquellas particitas que unidas forman piedras, llaman filósofos de seso jugo lapidífico.*

*[...] Observó La Hire que el agua que se filtraba por la tierra goteando de continuo en un hoyo del piso de la cantera, tenía encostrados los bordes con la materia misma. Sacó de este hoyo varias piedras esponjosas y en ellas notó ciertos filamentos que tuvo por vegetación lapidífica. Tomó el microscopio y con él observó que aquellos filamentos eran unos prismas con su determinada geométrica configuración. ¿Y que se siguió de una tal delicada observación? Ya lo dice: No queda razón de dudar de que aquellas que parecían vegetaciones hechas por algún jugo sensiblemente líquido, no lo eran sino unas incoadas encostraciones que, con el tiempo, vendrían a ser piedras que llenasen por su parte la cantera. [...] Yo tengo las ramas encostradas por el agua de Huancavelica y se ve en la Lámina 13 que todas ellas empezaron a engrosarse por capas de estos mismos prismas, una sobre otra hasta llegar a hacerse cuerpos grandes de piedra [51].*

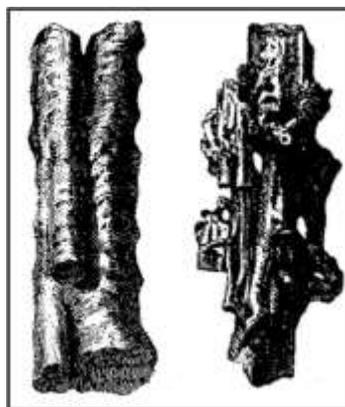


Figura 7. Ramitas petrificadas (Fuente: [51])

Como ilustración de los cuerpos citados por el franciscano, la Figura 7 muestra una parte de la mencionada Lámina 13 en la que se aprecian dos petrificaciones de ramitas y hojas que le fueron entregadas por Jerónimo de Sola; pueden compararse con la Fotografía 16, tomada en la surgencia

calcárea 4 (ver Figura 5) de Huancavelica, para apreciar las similitudes entre ellas.



**Fotografía 16.** Petrificaciones recientes en Huancavelica. Surgencia 4 (Fuente: Autor)

Para concluir con los testimonios coloniales, cabe citar en último lugar una extensa descripción de las aguas petrificadoras de Huancavelica que aporta Ulloa en 1772, en sus *Noticias americanas*. En la edición de 1792, ya satisfecha su curiosidad científica, comentaba lo siguiente:

*Hay ciertas aguas que tienen la propiedad de petrificar las cosas que caen en ellas, como las hojas de los árboles, las maderas, los huesos u otras, especialmente si abundan en porosidades: la causa de ello es que contienen mucha parte de limo sutil y algún ácido mineral que, al paso que se para aquel (el caudal de agua) se une y endurece fijándose en los remansos o en el mismo suelo del cauce; pero es particular que la misma agua pierda la fluidez, siendo una de las cualidades esenciales de ella, y que se fije formando canteras como las de cualquier otra piedra. Es común el concepto de decirse que la villa de Huancavelica está fabricada con piedra de agua, y que allí, la de ciertos manantiales que están inmediatos, se convierte en piedra que, después de cortada y labrada, se emplea en los edificios. Si lo antecedente es tan extraño no deberá serlo menos la circunstancia de que esta agua que forma la piedra es tan cristalina, transparente y pura que parece no contener cuerpo extraño. Aquella villa está rodeada de estos manantiales y, en cada uno de ellos, hay canteras de la misma piedra: el agua es caliente en tanto grado que de continuo humea pero, particularmente, al salir de la tierra de tal modo que, aunque no llega al grado de hervir, no se puede tener la mano mucho tiempo en ella. Reposada en un gran estanque cortado en la misma piedra, que está inmediato a uno de estos mismos ojos o manantiales, no se reconoce que haga incrustación en los costados ni que por el suelo deponga la materia que, petrificada, disminuya la profundidad. En él se crían aquellas hierbas que son normales en donde está el agua retenida. Los derrames del estanque, bañando la tierra por donde corren sin haber perdido del todo el calor, hacen en cuanto humedecen una costra delgada que tira a color amarillo que, con el transcurso del tiempo va engrosando y tomando cada vez más cuerpo. Al principio no es dura pero, a medida que se*

*va quedando más profunda, adquiere más consistencia. Las hierbas que no están arraigadas, las astillas o ramas que se quedan paradas en algún remanso, se petrifican igualmente y se encuentran incorporadas con las mismas costras. Esta piedra es ligera, aunque no tanto como el agua, porosa y blanda para cortas, cuyas cualidades conserva aún después de haber pasado tiempo de estar al aire. La hay de dos especies: una cenicienta clara y otra anaranjada. La primera es de más consistencia que la segunda, siendo distintas las canteras de lo cual debe colegirse que, según la especie de la tierra que baña el agua, así resulta la piedra distinta en el color y solidez.*

*El gusto del agua es malo, por ser gruesa y salobre, pero los efectos son peores y, por esto, los animales no la beben aunque estén precisados de la sed. En el olor no se percibe cosa extraña y usan de ellas para baños sin que se haya reparado haber ocasionado malos efectos.*

*Inmediato a Huancavelica y por su frente hay un cerro de regular altura, que llaman Potocche: del pie de éste, a corta distancia, salen varios ojos de agua; los unos las dan en extremo saludables y delicadas y los otros nocivas en el mayor grado. Las primeras salen en el grado de frialdad que es normal en aquel temperamento; las otras, con humareda tan abundante y densa, particularmente en la estación de los hielos, que forma nube sobre ella. De las unas a las otras habrá medio cuarto de legua (unos 650 m) y en esta corta distancia se encuentra repetida esta gran diferencia. Las calientes son las que, como va explicado, forman la piedra, de lo que se deja inferir que, aunque se hallan tan cercanos entre sí los surtideros, por el interior de la montaña siguen distintos conductos que no se comunican, siendo muy particular que alternándose unos ojos con otros, y siendo varios los que hay de cada especie, no se crucen por dentro ni salgan sus aguas mezcladas.*

*Estas aguas calientes petrificantes son muy regulares en la parte alta del Perú, encontrándose en muchos parajes, pero en ninguno son tan abundantes como en aquel territorio de Huancavelica. Sobre la formación de la piedra se ofrece un reparo, y es que los parajes que baña donde se reconocen las incrustaciones, no se ve que con el transcurso de los tiempos hayan crecido sensiblemente en altura más que las tierras contiguas, hallándose iguales con ellas, y las canteras de donde se saca la piedra están desde aquella superficie profundizando hacia abajo, de modo que se hacen hoyos muy profundos en donde se abre cantera, lo mismo que sucede con las de otras especies. Esto da lugar a creer no que el agua, como cree la vulgaridad, se convierta en piedra por un modo de coagulación, sino que tiene la propiedad de unir las partes de la tierra y darles la dureza que se ve en la piedra; de no ser esto, era preciso que el estanque que se ha dicho, después de los años que existe, se hallase macizado de la misma piedra, que las tierras que baña el agua creciesen sensiblemente en altura respecto de las otras inmediatas que no baña, y que los surtideros que están al igual de ella se tapasen y sucesivamente se abriesen por otros parajes más altos de la montaña, pero no hay tradición de que haya sucedido y así no hay indicios de la mutación del agua en piedra, no obstante las incrustaciones que se ven en ella [52].*

En esta descripción, Ulloa explicaba cómo pensaba que se formaba el travertino y, aunque sus ideas se iban aproximando a las causas ciertas de su precipitación, yerra en su razonamiento. No obstante, muestra una gran evolución respecto de sus opiniones de 1748. Los manantiales que cita separados 650 m corresponden a San Cristóbal (agua caliente) y a otra surgencia que parece manar de las areniscas del Grupo Goyllarisquizga (agua fría) que aún hoy día existe; son, por tanto, aguas de distinta procedencia y composición.

Así pues, a finales del siglo XVIII los conocimientos geológicos comienzan a experimentar un rápido incremento y ya se vislumbran las explicaciones racionales que se estuvieron buscando durante las centurias anteriores. Hoy día, los travertinos de Huancavelica siguen ahí, preparados para contribuir al desarrollo de la ciudad, mientras que las aguas termales y las petrificaciones pueden convertirse en atractivos turísticos y culturales para uso y disfrute de las generaciones venideras.

## **6. Los travertinos de Huancavelica como patrimonio geológico, una apuesta para el futuro**

La definición de patrimonio geológico está establecida oficialmente en España en la Ley del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad [53], que lo identifica como *el conjunto de recursos naturales geológicos de valor científico, cultural y/o educativo, ya sean formaciones y estructuras geológicas, formas del terreno, minerales, rocas, meteoritos, fósiles, suelos y otras manifestaciones geológicas que permiten conocer, estudiar e interpretar: a) el origen y evolución de la Tierra, b) los procesos que la han modelado, c) los climas y paisajes del pasado y presente y d) el origen y evolución de la vida.*

Como se deduce de esta definición, el estudio del patrimonio geológico es complejo porque en él se conjugan aspectos científicos, técnicos, culturales, económicos, estratégicos, recreativos y sociales, aunque siempre en relación con procesos y elementos naturales de origen geológico.

En su acepción más amplia, el patrimonio geológico puede presentar interés científico, cultural y/o educativo, e incluso paisajístico o recreativo. Pero lo que se suele valorar fundamentalmente es el valor científico, es decir, la información que ese lugar proporciona a la hora de recomponer la historia geológica de la zona o ilustrar el funcionamiento de un determinado proceso geológico. Por eso se suele valorar su rareza, escasez, singularidad o representatividad dentro de la geología local, entre otros criterios de valoración.

Sin embargo, el interés del patrimonio geológico a menudo supera el ámbito científico y natural y se aproxima a otros aspectos ecológicos o culturales. En muchas ocasiones el patrimonio geológico guarda una estrecha relación con el patrimonio histórico-artístico, con las tradiciones, creencias y folklore de algunos lugares, e incluso puede tener una importante significación religiosa o convertirse en signo de identidad local.

Contemplado en este sentido, los travertinos de Huancavelica constituyen un patrimonio geológico de primer orden debido, además de a su singularidad como fenómeno

geológico, a la importancia que tuvieron en la creación y mantenimiento de la ciudad en la época virreinal y republicana, hasta que los bloques de piedra termal fueron sustituidos por otros materiales, como el ladrillo cerámico. Sólo falta que sea reconocido como tal y protegido como merece.

La utilización de este patrimonio geológico como elemento cultural y lúdico, junto con otro existente en Huancavelica, como el mega yacimiento de mercurio de Santa Bárbara, los fenómenos erosivos en Sachapite y los grandes pliegues de la Formación Chulec al sudeste de la ciudad, puede constituir un recurso importante para el desarrollo local de la ciudad y su entorno. Sin embargo, para ello, hay que conocer bien el patrimonio y eso implica su estudio previo con el objetivo final de identificar, valorar, conservar y divulgar aquellos lugares que posean un elevado valor en relación con las Ciencias de la Tierra [33, 54, 55].

La importancia del patrimonio geológico, como pueden ser los travertinos de Huancavelica, ha sido reconocida en 2008 por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) mediante la moción CGR4.MOT055 titulada Conservación de la geodiversidad y del patrimonio geológico. Este hecho es relevante ya que UICN es la organización ambiental global más antigua y grande del mundo pues agrupa a más de 1.000 organizaciones miembros, tanto gubernamentales como no gubernamentales, y casi 11.000 científicos voluntarios en más de 160 países. La adopción de esta resolución supone un primer paso para detener la pérdida de patrimonio geológico. ¿Qué tiene de especial este hecho? En los sesenta años de historia de la UICN la mayor parte de los esfuerzos se han centrado en la conservación de los aspectos bióticos pero a partir de 2008 el concepto de conservación de la naturaleza debe extenderse a los aspectos geológicos (geodiversidad), que también deben ser considerados a la hora de declarar y gestionar las áreas naturales protegidas [56].

## **7. Conclusiones**

Durante siglos, las petrificaciones de plantas y el travertino de Huancavelica fueron rarezas muy conocidas pero inexplicadas. Las primeras se confundieron con fósiles auténticos debido a la falta de conocimientos paleontológicos precisos; por su parte, el travertino fue una roca muy utilizada como material de construcción, la piedra termal, y es visible hoy día en un gran número de casas de la ciudad. Estos fenómenos son citados repetidamente por distintas personas en la época virreinal, las cuales intentaron explicar su origen apelando a razonamientos de todo tipo acordes con los conocimientos de la época aunque, no obstante, la mayoría los cita como una mera curiosidad. Las ideas fueron evolucionando con el tiempo llegando a aproximarse grandemente a lo que actualmente se conoce sobre la precipitación de travertinos. Dichos fenómenos naturales, aunque reseñados en muchos otros lugares del Perú virreinal, en ninguno adquirieron la relevancia e importancia que han tenido en la ciudad de Huancavelica. Por todo lo anterior puede considerarse que las formaciones travertínicas que existen en el entorno del río Ichu, que constituye su drenaje hidrológico natural, tienen entidad e importancia económica y científica suficientes para que sean consideradas patrimonio geológico de primer orden. Para que así sea

conceptuado, es el momento de acometer un estudio pormenorizado de estos fenómenos.

## Bibliografía

- [1] Pelayo, F. 1996. *Del Diluvio al Megaterio*. Cuadernos Galileo de Historia de la Ciencia, 16. Consejo Superior de Investigaciones Científicas., Madrid.
- [2] Perejón, A. 2001. Aproximación a la historia de la Paleontología española. *Enseñanza de las ciencias de la tierra*, 9 (2), 127-143.
- [3] Limón, A. 1979. *Espejo cristalino de las aguas de España (1697)*. IGME, Madrid.
- [4] López de Gomara, F. 1552. *Historia General de las Indias*. Zaragoza. Cap. CXCIV. **Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes**, España, 25/03/10, <http://www.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/02588400888014428632268/index.htm>.
- [5] Ruiz, H. 1952. *Relación histórica del viaje que hizo a los reynos del Peru y Chile el botanico D. Hipolito Ruiz en el año de 1777 hasta el de 1788, en cuya epoca regreso a Madrid*. Tomo Primero. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Madrid.
- [6] Alonso, A. 1995. *Arte de los metales (1640)*. E.T.S. Ingenieros de Minas, Madrid.
- [7] León Pinelo, A. 1943. *El Paraíso en el Nuevo Mundo (1656)*. Comité del IV Centenario del descubrimiento del Amazonas. Lima, II.
- [8] Gumilla, J. 1745. *El Orinoco ilustrado y defendido. Historia natural, civil y geográfica de este gran rio y de sus caudalosas vertientes*. Imprenta Manuel Fernández, Madrid.
- [9] Ulloa, A. 1990. *Viaje a la América meridional (1748)*. Historia 16, Madrid.
- [10] Orche, E.; Amará, M.P. 2010. Las aguas petrificadoras de Huancavelica (Perú) según testimonios coloniales de los siglos XVI a XVIII. Romero, E. (Coord.). *Patrimonio Geológico y Minero. Una apuesta por el desarrollo local sostenible*. Universidad de Huelva, 99-111.
- [11] Pentecost, A.; Viles, H. 1994. A Review and reassessment of travertine classification. *Géographie physique et Quaternaire*, 48(3), 305-314.
- [12] Carcavilla, L.; Vegas, J.; Cabrera, A. M. 2019. *Establecimiento de una tipología específica de formaciones tobáceas*. Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid.
- [13] Mota, A.J. 2011. *Química del medio ambiente. Parte 2. El agua. Tema 6. Química de los procesos ácido-base en aguas naturales. El sistema CO<sub>2</sub>/Carbonato*. 3/11/2021. <https://www.ugr.es/~mota/Parte2-Tema06.pdf>.
- [14] Beltrán, J.C.; Guajardo, C.; Barceló, I.D.; López, U.J. 2017. Biotratamiento de efluentes secundarios municipales utilizando microalgas: Efecto del pH, nutrientes (C, N y P) y enriquecimiento con CO<sub>2</sub>. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52 (3), 417-427.
- [15] Fagundo, J.R.; González, P. 2004. Estudio indirecto de la carsificación mediante métodos experimentales y mediciones de campo. *Geotech13. Contribuciones al desarrollo de la Hidrogeoquímica*.
- [16] Custodio, E. 1996. Principios básicos de química y radioquímica de aguas subterráneas. En Custodio, E.; Llamas, M.R. *Hidrología Subterránea*, 174-199.
- [17] Anselmo, A.N. 2017. *Génesis de travertinos en Baños Colina y Baños Morales, Cajón del Maipo, Región Metropolitana*. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- [18] Del Ramo, A.; Guillén, F. Travertinos. Región de Murcia Digital, España, 3/11/2020, [https://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c.365.m.108&r=ReP-8173-DETALLE\\_REPORTAJESABUELO](https://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c.365.m.108&r=ReP-8173-DETALLE_REPORTAJESABUELO).
- [19] Westbroek, P. 1991. *Life as a geological force: dynamics of the Earth*. Norton, New York.
- [20] Krumbein W.E. 1994. The year of the slime- instead of an introduction. En Krumbein, W.E.; Paterson, D.M.; Stal, L.J. (eds.) *Biostabilisation of sediments*. Bibliotheks und Informationssystem der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. BIS-Verlag, Oldenburg, 1-7.
- [21] Zhu, T.; Ditttrich, M. 2016. Carbonate precipitation though microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: a review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2016.00004>.
- [22] Della Porta, G.; Hoppert, M.; Hallmann, C.; Schneider, D.; Reitner, J. 2021. The influence of microbial mats on travertine precipitation in active hydrothermal systems (Central Italy). *The Depositional Record*. 00, 1-45. <https://doi.org/10.1002/dep2.147>.
- [23] Shiraishi, F.; Hanzawa, Y.; Nakamura, Y.; Eno, Y.; Morikawa, A.; Mattos, R.; Asada, J.; Fadel, L.; Bahniuk, A.M. 2021. Abiotic and biotic processes controlling travertine deposition: Insights from eight hot springs in Japan. *Sedimentology*. Junio. DOI: [10.1111/sed.12916](https://doi.org/10.1111/sed.12916).
- [24] Pentecost, A. 1996. Moss growth and travertine deposition: the significance of photosynthesis, evaporation and degassing of carbon dioxide. *Journal of Bryology*, 19, 229-234.
- [25] Lyons, M.D.; Kelly, D.L. 2016. Monitoring guidelines for the assessment of petrifying springs in Ireland. *Irish Wildlife Manuals*, Nº 94, National Parks and Wildlife Service. Ireland.
- [26] Bernal, J.P.; Uruchurtu, G. 2011. Revelaciones de una Cueva. ¿Cómo se?, 155, 10-14.
- [27] Moore, G.W. 1962. The growth of stalactites. *Bulletin of the National Speleology Society*. 24 (2), 95-106.
- [28] Slack, K.V. 1967. *Physical and chemical description of Birch Creek, a travertine depositing stream, Inyo County, California*. Geological Survey Professional Paper 549-A. Washington.
- [29] Lyons, M.D.; Kelly, D.L. 2021. Rapid tufa deposition and bryophyte growth rates in Irish petrifying springs.

## Enrique Orche García

*Journal of Bryology*, 43 (2).

<https://doi.org/10.1080/03736687.2020.1844990>.

[30] Anónimo. Mother Shipton's Cave and the petrifying well. Knaresborough, England, 9/11/2021, <https://www.atlasobscura.com/places/mother-shipton-s-cave-and-the-petrifying-well>.

[31] Batut, S. 2019. The petrifying well that turns objects into stone, 9/11/2021, <https://www.thevintagenews.com/2019/05/04/petrifying-well/>.

[32] Patowary, K. 2015. *The petrifying well of Knaresborough*, 9/11/2021, <https://www.amusingplanet.com/2015/08/the-petrifying-well-of-knaresborough.html>.

[33] Orche, E.; Amaré, M.P. 2020. *Valorización del patrimonio natural y cultural de la ciudad de Huancavelica (Perú) y su entorno*. SEDPGYM. Vigo.

[34] Wise, J.M. 2000. Geologic map of the Huancavelica mercury district, Peru.

[35] Lohmann, G. 1949. *Las minas de Huancavelica en los siglos XVI y XVII*. Escuela de Estudios Hispano-americanos, Sevilla.

[36] Archivo General de Indias (AGI). 1790. Primer plano geométrico y prospectos, cuya vista ha de tomarse del Río Grande de la villa de Huancavelica al Calvario. AGI, MP-Perú y Chile, 225.

[37] Mendiluce, M. 1878. *Diccionario histórico-biográfico del Perú*. Tomo III. Lima. Págs. 12-13.

[38] Mercurio Peruano del día 28 de abril de 1791. Mercurio Peruano. Tomo I que comprende los meses de enero, febrero, marzo y abril de 1791. Lima. Págs. 308-312.

[39] Raimondi, A. 1902. *El Perú. Estudios mineralógicos y geológicos*. Tomo IV. Sociedad Geográfica de Lima, Lima, 326-327.

[40] Raimondi, A. 1865. Plano topográfico de la ciudad de Huancavelica, 1862. En Paz, M.F. *Atlas geográfico del Perú*. Fermí Didot e Hijos y Cía. Paris.

[41] Turismo.pe. Turismo en Aguas termales del Barrio de San Cristóbal (Naturaleza), 11/11/2021, <https://turismo.pe/naturaleza/banos-termales/aguas-termales-del-barrio-de-san-cristobal.htm>.

[42] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Guía Estadística 2000. Conociendo Huancavelica. Huancavelica.

[43] Jefatura del Estado. Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. Artículo 23.2.

[44] Acosta, J. de. 1987. *Historia natural y moral de las Indias (1590)*. Historia 16, Madrid.

[45] Cárdenas, J. 2003. *Problemas y secretos maravillosos de la Indias (1591)*. Maxtor, Valladolid.

[46] Vargas, B. 2003. *Milicia y descripción de las Indias (1599)*. Seminario Iberoamericano de Descubrimientos y Cartografía-Universidad de Valladolid, Valladolid.

[47] Ávalos, D. de. 1603. *Primera parte de la Miscelánea Austral*. Coloquio XXX. Lima.

[48] Palacios, B. 2020. *Entre la historia y la ficción: estudio y edición de la Historia del Huérfano de Andrés de León (1621), un texto inédito de la América Colonial*. IDEA. Nueva York.

[49] Calancha, A. de la. 1638. *Chronica moralizada del Orden de S. Agustín en el Perú, con sucesos egeplares en esta monarquía*. Pedro Lacavallería, Barcelona, I.

[50] Freizier, M. 1732. Relación du voyage de la mer du Sud aux côtes du Chili et du Pérou. Paris. En Raimondi, A. 1902. *El Perú. Estudios mineralógicos y geológicos*. Tomo IV. Sociedad Geográfica de Lima, Lima.

[51] Torrubia, J. 2007. *Aparato para la Historia Natural Española (1754)*. Universidad de Granada, Granada.

[52] Ulloa, A. 1993. *Noticias americanas (1772)*. E.T.S. Ingenieros de Minas, Madrid.

[53] Jefatura del Estado. Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, Artículo 3.38.

[54] Instituto Geológico y Minero de España (IGME). *Patrimonio geológico*, 11/11/2021, <https://www.igme.es/patrimonio/Pg/patrimonioG.htm>.

[55] Orche, E. 2012. *Patrimonio geológico y minero*. Máster universitario en tecnologías para la protección del patrimonio cultural inmueble. Universidad de Vigo.

[56] Comisión de Patrimonio Geológico de la Sociedad Geológica de España (CMPSGE). 2008. *Un gran logro para la geoconservación*. Nota de prensa, 10/11/2021, [https://www.igme.es/patrimonio/Pg/nota\\_prensa\\_UICN\\_espa%C3%B1ol.pdf](https://www.igme.es/patrimonio/Pg/nota_prensa_UICN_espa%C3%B1ol.pdf).

Artículo recibido en: 18.10.2021

Artículo aceptado: 02.11.2021