

EMPLEO DE ESPORAS DE *LYCOPodium CLAVATUM* COMO MARCADORES DE AGUAS SUBTERRANEAS EN ACUÍFEROS KARSTICOS

Roberto SPANDRE ¹

G. BATISTI ¹

Ernani Francisco da ROSA FILHO ²

Eduardo Chemas HINDI ²

Donizeti Antonio GIUSTI ²

RESUMEN

El objeto del estudio es la determinación de las conexiones hidráulicas subterráneas entre las canteras de explotación de mármoles de los Alpes Apuanos y los manantiales de abastecimiento de agua potable del acueducto de Carrara (Italia).

La utilización de aceites, grasas e hidrocarburos en los procesos de trabajo (corte, manejo y transporte del mármol) en las canteras, produce periódicamente contaminaciones que se registran en las captaciones de agua para uso público. Las características kársticas de los acuíferos de los Alpes Apuanos hacen muy complicado el uso de trazadores tradicionales porque estos o vienen "capturados e inhibidos" por la "*marmettola*" (polvo sutil producido por el corte de los bloques de mármol y arrastrado en las fracturas kársticas) o no se pueden utilizar por su toxicidad dado que se trata de un sistema acuífero totalmente explotado para fines hidropotables.

Las posibilidades de "marcar" varios puntos de inyección con esporas de distintos colores y proceder a la introducción del marcador en varias estaciones (se han utilizado esporas coloreadas con 5 colores atóxicos diferentes) y al mismo tiempo, nos permite seguir, de forma completa, el "viaje" de las esporas hasta las "trampas" ubicadas en los puntos elegidos para su interceptación.

Los diferentes colores recogidos en el filtro de la trampa nos indican las conexiones hidráulicas existentes entre el manantial y el o los puntos de inyección. Afinando la técnica se puede llegar a establecer, a través de una valoración numérica (o sea confrontando la cantidad de esporas del mismo color y su variación el tiempo) cuáles pueden ser los circuitos principales (y los tiempos de respuesta), que contribuyen más al transporte del contaminante hasta la captación monitoreada.

Palabras Clave: *Esporas de Lycopodium, trazadores, contaminación, hidrocarburos y aceites, karst*

LA GEOLOGIA DE LOS ALPES APUANOS

Los Alpes Apuanos representan un elemento único en el panorama geológico italiano. Se trata de un Metamorphic Core Complex que posee una situación estructural muy compleja y también una gran variedad de formaciones geológicas.

Las formaciones de los Alpes Apuanos se reparten en tres dominios principales: el Core Complex, la "Falda Toscana" metamórfica, la "Falda Toscana" no metamórfica. Estos tres grandes dominios estaban sobrepuesto uno con

otro pero, la tectónica de distensión que los caracteriza, ha hecho posible el desplazamiento de la "Falda Toscana" hacia los lados del Core Complex.

Las formaciones del Core Complex y de la "Falda Toscana" metamórfica tienen edades comprendidas entre el Ordovícico (Cambiano quizás) y el Oligoceno superior y están caracterizadas por una serie de eventos metamórficos epizonales (esquistos verdes). La parte más baja de la serie empieza con las Filas Inferiores que pasan a Cuarcitas y

¹ Universidad de Pisa-Departamento de Scienze dell'Uomo e dell'Ambiente. Via A. Volta, 6. 56126 Pisa (rspandre@scamb.unipi.it).

² Universidade Federal do Paraná (Curitiba, Brasil).

Dolomias, después al “Verrucano” por encima del cual se colocan todas las series de los Marmoles y que tienen al techo las Calizas “Selciferas”.

Las formaciones de la “Falda Toscana” no metamórfica están prevalentemente constituidas por el “Calcare Cavernoso” (Norico), arriba de este se encuentra una serie de formaciones de calizas y margas que van desde las formaciones del Retico (Calizas y Margas a Rethavicula contorta) a las calizas macizas (Lias Inferior hasta el medio-superior). Arriba se ubican las Margas a Posidonia (Lias Superior-Dogger), con características calcareas, los Diaspros del Malm, la Maiolica (Titoniano Superiore-Cretaceo Inferior), la *Scaglia toscana* (Cretaceo Inferior-Oligocene). El último término es el *Macigno* (Oligocene Superiore-Miocene Inferiore) que es una arenisca cuarzosa-feldespática, alternada con niveles de arcillitas siltosas.

Los niveles más altos de estas dos series están recubiertos por depósitos cuaternarios. Los orígenes de estos depósitos son de tipo glacial, fluvio-glaciales, fluviales o aluviales. Un caso a parte son los “*ravaneti*” o sea las escombreras del detrito y de los desechos producidos por las canteras de extracción de los mármoles y, por lo tanto, de origen antropica.

LAS CANTERAS

En el territorio apuano, vista la grande abundancia de mármol de diferentes tipos y calidades se ha extendido muchísimo el industria lapidea que en la actualidad cuenta con unas 168 canteras y con más de 430 entre aserrios de mármol y talleres de laboración de las piedras. Las canteras han aumentado de forma indiscriminada desde los primeros años post belicos a causa de una cada vez mayor demanda de estos materiales. Paralelamente al desarrollo de la cantera se han ido incrementando los problemas conexos a su presencia en el territorio: impacto ambiental, (laderas destrozadas y abiertas por las explotaciones y sin ninguna posibilidad posterior de un desarrollo de la vegetación), impacto hidrogeológico (alteración de las escorrentías superficiales y del flujo subterráneo, contaminación de los acuíferos y de los manantiales), seguridad (riesgos de derrumbes debidos a la inestabilidad de las laderas donde se encuentran las escombreras (*ravaneti*), incidentes de trabajo), impacto acústico.

Las escombreras (*ravaneti*) de los desechos de las canteras tienen un muy alto impacto ambiental y, además, ostaculan el drenaje de las aguas favoreciendo así el acarreo de contaminantes sólidos (“*marmettola*”) y líquidos (aceites e hidrocarburos principalmente). Todos estos efectos se reflejan en las aguas subterráneas que alimentan los manantiales

entre los cuales se encuentran los del presente estudio: *Tana dei Tufi* y *Pizzotello*. Estos dos manantiales se localizan en la cuenca de Torano y sufren muy a menudo una contaminación por *marmettola* y en ciertas ocasiones, han sido cerrados por la presencia de hidrocarburos. En esta cuenca hay cinco canteras abiertas, algunas de las cerradas ya han presentado las solicitudes y los proyectos para seguir siendo explotadas y, las agotadas, en ciertas ocasiones, vienen utilizadas como vertederos de áridos y materiales varios. Durante el curso de los años se ha intentado de sanear el problema del aumento salvaje de los “*ravaneti*” no utilizando más los explosivos para sacar el mármol (producía hasta el 85 de desecho) sino el hilo helicoidal más una cierta cantidad de explosivos (con desechos superiores al 85%) y, mas adelante, el cable diamantado (que produce solo el 40% de material inutilizable). Solo en los últimos años se ha encontrado la manera de reutilizar estos desechos por parte de las industrias químicas y farmacéuticas, reduciendo así la acumulación del material sobrante.

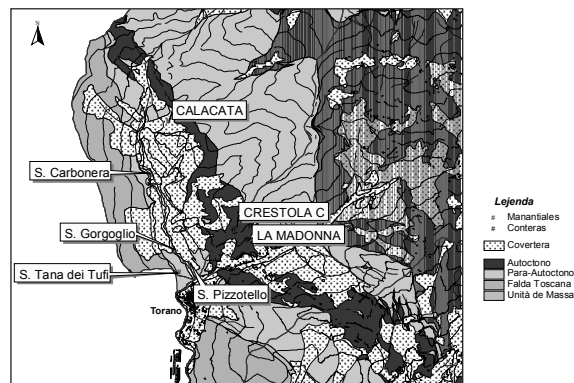


Fig.1: DESCRIPCIÓN DE LA “TRAMPA” DE CAPTURA DE LAS ESPORAS

La trampa está formada por dos piezas que, unidas entre sí, tienen forma de tubo de Venturi.

Esta forma ha sido pensada para reducir las turbulencias en el interior de la trampa misma y limitar la salida de las esporas arrastradas por los flujos laminares del agua.

La parte anterior está formada por un cono, realizado con una red metálica de diámetro de 30 cm. El interior ha sido recubierto por un filtro de nylon con poros de 25 μm . La parte posterior es un tronco de cono de 40 cm de altura. Los diámetros, de entrada y salida del agua, son respectivamente 10 cm y 20 cm. La boca de salida está parcialmente ocupada por una corona circular hecha con material filtrante (el mismo utilizado en los lados de la trampa), para aumentar la recogida de las esporas. Las

dos partes han sido unidas mediante un corto tubo de 15 cm de largo y de 10 cm de diametro. Toda la trampa ha sido fijata rigidamente a un tubo en el interior del manantial.



Fig. 2 - LAS ESPORAS

El *Lycopodium clavatum* es una planta bastante común, sobretudo en las regiones septentrionales de Europa, caracterizadas por climas poco lluviosos y ricas en bosques, pastizales y montañas. Se recoge sobretudo en Alemana, Rusia y Suiza en los meses de julio y agosto.

El *Lycopodium clavatum* es una planta trepadora perene, caracterizada por un tallo de longitud variable recubierto por hojas siempreverdes lisas y alargadas. Desde el tallo se levantan varias ramas, largas entre dos y cuatro pulgadas, recubiertas de hojas: las fertiles tienen un pedunculo terminal que sujetas unas espigas cilindricas que contienen las esporas.



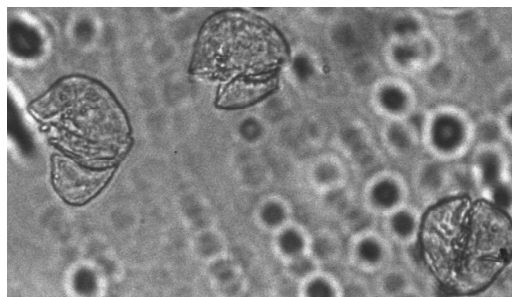
Las esporas, tienen un diametro medio de 30 micron, constituyen un polvo muy muy fino, de color amarillo claro, muy mobil, inodoro, sin sabor que fluctua sobre el agua y no viene mojado por la misma. Al microscopio las esporas aparecen con la superficie recubierta por un reticulo de crestas y con los bordes irregulares.

Espora de *Lycopodium*
Lycopodium Clavatum



[vista al SEM (a) y al microscopio (b)]

[a]



[b]

El uso principal de estas esporas se encuentra en el campo de la medicina homeopatica como remedio para numerosos disturbios. Desde el 1953, gracias al austriaco A. Mayr, estas esporas han sido utilizadas tambien como trazadores. En la clasificaci3n de los trazadores estan entre las sustancias retenidas por filtros mecanicos como la harina, la paja, el serrin, todos productos con un peso especifico aproximadamente igual a uno. Estas sustancias se mantienen en suspensi3n por el movimiento vorticoso del agua y se detectan tramite observaci3n directa. La verdadera ventaja del utilizaci3n de las esporas es la posibilidad de usar contemporaneamente distintos colores: se puede por lo tanto efectuar inyecciones multiples y contemporaneas en distintos lugares, definiendo asi con un "etiquetado" los diferetes circuitos y recorridos desde los puntosde introducci3n hasta los de muestreo. Otra ventata es la de poder contar con filtros capaces de retener las esporas. Existen tambien unos inconvenientes: el primero es la presencia de sedimentos muy finos en las fisuras que pueden ralentizar o bloquear, a veces, el paso de las esporas (efecto filtro), el otro es su velocidad de sedimentaci3n, comprendila ente 1 y 10 cm/hora en el caso de aguas con velocidad de flujo muy lentas (por ejemplo en ciertas aguas superficiales).

PREPARACI3N DE LOS COLORANTES

Para la coloraci3n de las esporas se ha seguido la siguiente metodologia: se han tomado 10 ml de colorante alimentar (o anilina) que han sido diluidos en 50 ml de agua destilada. A continuaci3n se han sumergido las esporas en la soluci3n y se ha llevado a ebullici3n para favorecer la fijaci3n del colorante sobre las

mismas. Una vez enfriada, la solución ha sido filtrada para separar las esporas de la parte líquida y el filtro se ha puesto a secar para favorecer el despegue de las esporas.

INYECCIONES EN LAS FRACTURAS

Unos 500 grs de esporas han sido introducidas en cada una de las fracturas, oportunadamente escogidas, elegidas en el interior de las canteras objeto de las investigaciones. Previamente a la prueba se había realizado una labor de análisis estructural de las fracturaciones principales presentes en el área de estudio



Las esporas han sido introducidas en las fracturas mediante una inyección de agua correspondiente a un volumen estimado, de unos 2000 litros durante dos horas.

METODO DE MUESTREO

Las trampas han sido realizadas de tal manera que el armazón queda siempre ubicado en el lugar de muestreo y lo que se quita es únicamente el filtro con las esporas. Para examinar el contenido del filtro, una vez en laboratorio se desliza el material atrapado en un becker por medio de un chorro de agua destilada (a simple vista no se pueden ver las esporas porque normalmente están mezcladas con una elevada cantidad de sedimentos).

Se puede también no recoger las muestras mediante filtros de red, en este caso simplemente se toman muestras de agua con un determinado intervalo de tiempo y después se filtran en laboratorio. Es evidente que este método es muy poco sensible y, sobre todo, deben ser recolectadas muchas muestras en el tiempo y muy a menudo.

ANÁLISIS DE LABORATORIO

Si las muestras no pueden ser analizadas rápidamente se aconseja agregar al agua un

poco de formaldeído para mantener estable las esporas. Antes de pasar las muestras al microscopio para la identificación de las esporas y de los colores, se debe realizar un tratamiento de la muestra misma para separar las esporas del sedimento. La muestra viene tratada inicialmente con KOH o con otro ácido, o mejor, se efectúan ambos ataques para destruir la materia orgánica y las partículas de calizas. El residuo, recogido con agua destilada, viene centrifugado a 3000 rpm para concentrar las esporas y analizado a continuación al microscopio para identificar las esporas, por su forma y por su color. Se pueden también realizar exámenes cuantitativos con el objeto de contar las esporas recogidas en cada muestra.

RESULTADOS

El resultado de las pruebas ha puesto de manifiesto una clara conexión hidráulica entre las canteras y los manantiales, si bien con características hidrodinámicas y velocidades de flujo distintas, según la posición de los lugares de inmisión de los trazadores respecto a las principales líneas de fracturas. Hay también que subrayar que las pruebas fueron ejecutadas en un período de sequía prolongada, razón por la cual el acuífero estaba en condiciones de flujo mínimo de base. Las primeras esporas fueron interceptadas a partir de las 6 horas siguientes a la inyección y la prueba se declaró concluida a los tres días del comienzo de la misma. Es importante subrayar como unas esporas introducidas en el río Porcinaccia (véase figura) fueron interceptadas por las trampas ubicadas en los manantiales de las 5 Fontanas, en el valle adyacente a lo del río objeto de la prueba.

CONCLUSIONES

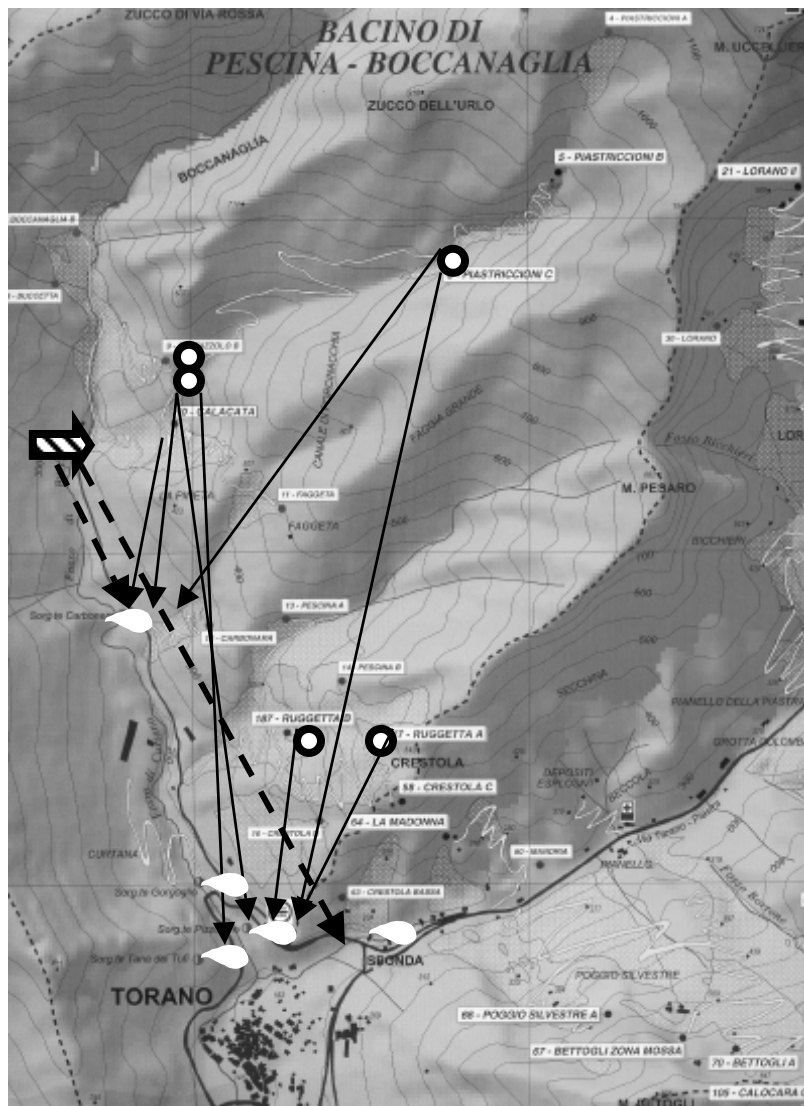
La puesta a punto de una metodología capaz de utilizar esporas naturales y no agresivas como marcadores en estudios hidrogeológicos ha proporcionado resultados muy satisfactorios.

Este método, utilizando esporas de distintos colores, ha permitido el monitoreo de varios puntos al mismo tiempo y bajo las mismas condiciones hidrogeológicas y meteorológicas.

Se han encontrado y probando varios tipos de pigmentos para la coloración de las esporas, no tóxicos y no solubles en agua también después de muchos días de permanencia en el acuífero. Los colorantes utilizados poseen características químicas distintas entre sí y por lo tanto se hizo necesaria la adopción de técnicas de fijación variables para los distintos grupos.

BIBLIOGRAFIA

- ATKINSON T.C., 1968. Tracing swallet waters using Lycopodium spores. *Trans Cave Research Group of Great Britain*, 10 (2), 99-105.
- BALBIANO D'ARAMENGO C., 1972. Attuali disponibilità e possibilità dei traccianti idrologici in speleologia. *R.S.I.*, IV, 2, 157.
- BALBIANO D'ARAMENGO C., 1983. Modalità d'impiego dei traccianti colorati in speleologia. Guida didattica n° 4, supplemento alle "Memorie dello Speleo Club Chieti".
- CARMIGNANI L., 1985. Carta geologico-strutturale del complesso metamorfico delle Alpi Apuane, scale 1:25000, Foglio Nord, Litografia Artistica Cartografica, Florence, Italy.
- CARMIGNANI L., Giglia G., 1975a. Aperçu sur la géologie des Apuanes. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, 17, 963-977.
- DECHANT M., 1960. Das Anfärben von Lycopodiumsporen. In Maurin V. & Zötl J. (eds), *Untersuchung der Zusammenhänge unterirdischer WÄSSER MIT BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER KARSTVERHÄLTNISSE*, vol. 12, 145-149. Graz: Beiträge zur alpinen karstforschung.
- HÖTZL H., MAURIN V. & ZÖTL J., 1976. Results of the Injection of lycopodium Spores. *International Symposium of Underground Water Tracing*, 3, 167-181.



**UBICACION DE LOS PUNTOS
DE INMISION Y TOMA DE LOS
TRAZADORES**