

# Ensayos termo-hidráulicos con bentonita compactada en celdas a alta temperatura

Ana María Melón Sánchez (1), Vanesa Gutiérrez Rodrigo (1\*), María Victoria Villar Galicia (1), Ana Esther González García (1)

(1) Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 28040, Madrid (España)

\* corresponding author: [vanesa.gutierrez@ciemat.es](mailto:vanesa.gutierrez@ciemat.es)

**Palabras Clave:** Bentonita, Sales solubles, Complejo de cambio, Temperatura. **Key Words:** Bentonite, Soluble salts, Exchangeable cations, Temperature.

## INTRODUCCIÓN

Los ensayos termo-hidráulicos en celdas permiten reproducir en laboratorio las condiciones a las que se verá sometido el material que conforma una de las barreras de un almacenamiento geológico profundo de residuos radiactivos, la bentonita compactada. Este ensayo permite recopilar datos tanto en tiempo real y a largo plazo, esenciales para la validación de modelos que predicen el comportamiento termo-hidro-mecánico (THM) de la bentonita, como analizar las modificaciones sufridas por la bentonita cuando el ensayo finaliza y se desmonta.

En el marco del proyecto EURAD-HITEC, el CIEMAT ha desarrollado dos ensayos termo-hidráulicos utilizando bentonita tipo Wyoming en celdas cilíndricas de 10x10 cm. Estas celdas fueron sometidas a una temperatura de 150°C en el extremo inferior, que simula el calor emitido por los residuos radiactivos en su desintegración, mientras que el superior fue hidratado con dos aguas de distinta composición: una glacial (celda HT1) y una salina con una concentración elevada de cloruro, sodio y sulfato (celda HT2), para simular la entrada de agua subterránea proveniente de la roca circundante y replicar las condiciones de diferentes formaciones geológicas potenciales de almacenamiento (Villar et al. 2024). Durante el ensayo, las celdas proporcionaron datos en tiempo real de temperatura, humedad relativa y presión medidas por sensores a distintos niveles y, después de 2,5 años funcionamiento, se desmontaron las celdas y se muestreó la bentonita para analizarla en detalle por secciones localizadas a distintas posiciones a lo largo del bloque.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 1 muestra los gradientes de humedad y densidad seca a lo largo de las secciones de las columnas ensayadas, HT1 y HT2. En la mitad superior de ambas columnas, la humedad es similar, pero, en los 4 cm próximos al calentador, se observa una diferencia considerable, especialmente en la celda HT2, donde se registra un nivel notablemente más seco. La densidad seca final global es mayor en la columna HT2, probablemente debido a un aumento en el contenido de sales, resultado de la hidratación con agua salina y de una probable evaporación causada por fugas detectadas a través de las conexiones de los sensores instalados a lo largo de la columna.

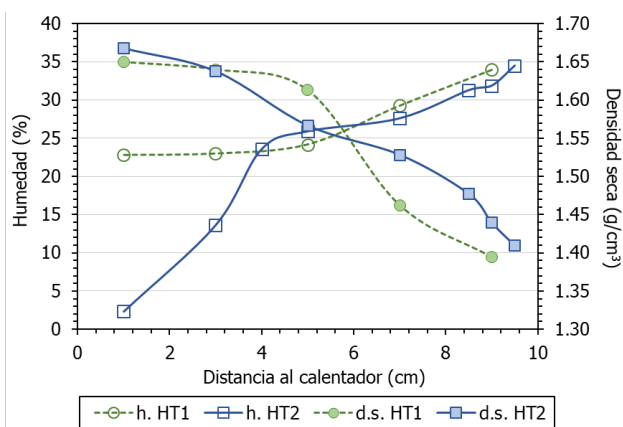
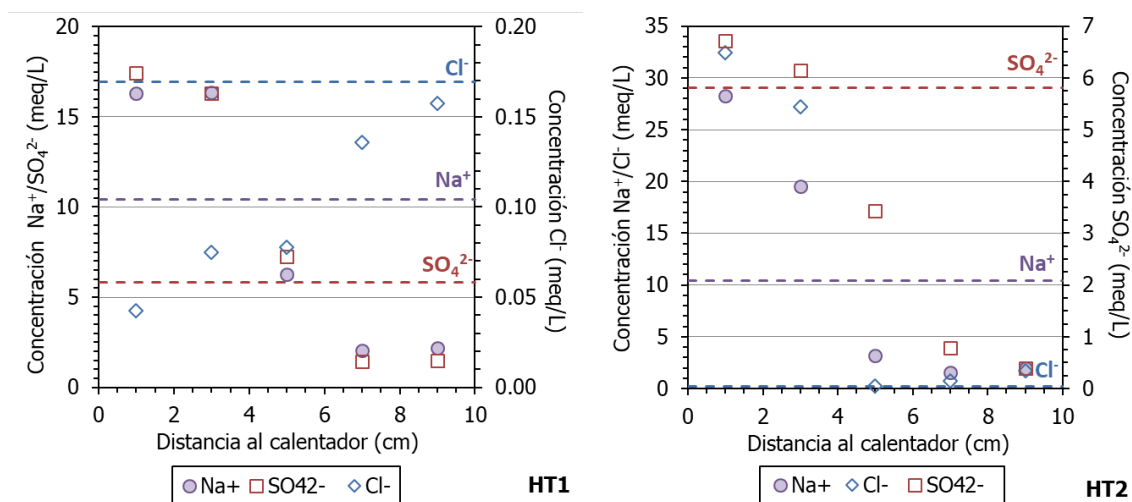


Fig. 1. Humedad (h.) y densidad seca (d.s.) a lo largo de la columna de bentonita de las celdas HT1 y HT2.

Para estimar los procesos geoquímicos de disolución y precipitación de especies minerales e intercambio catiónico, se realizaron las determinaciones de sales solubles y cationes intercambiables, así como análisis mediante FTIR (infrarrojos por transformada de Fourier) para determinar posibles cambios en la estructura de la esmectita.

En ambas celdas se observa un aumento constante en las concentraciones de cationes hacia el calentador, superando los valores de la bentonita de referencia. Sin embargo, en la mitad superior del bloque, cerca de la superficie de hidratación, dichas concentraciones disminuyen en comparación con los valores originales debido a su transporte advectivo hacia el calentador. Este fenómeno es más notable en la celda HT2 (Fig.2), hidratada con agua salina, lo que sugiere que muchos de estos cationes proceden del agua de hidratación. En el caso del catión sodio, es probable que su aumento también se deba a su liberación desde la interlámina de la bentonita original, donde es reemplazado por calcio.

En cuanto a los aniones, parece que el sulfato, cuya concentración en las aguas de hidratación no es elevada, proviene de la bentonita original. De hecho, en FTIR se ha identificado la presencia de yeso en la zona de hidratación y anhidrita cerca del calentador. Con respecto a la concentración de cloruro, la tendencia difiere significativamente entre las celdas, disminuyendo hacia el calentador en la celda HT1 y aumentando en la celda HT2 debido a la presencia de sales precipitadas en esa zona.



**Fig 2.** Concentración medida en extractos acuosos 1:8 de los principales cationes a lo largo de la columna de bentonita de las celdas HT1 y HT2. Las líneas horizontales discontinuas representan los valores de referencia de la bentonita.

El complejo de cambio de las muestras tratadas tiene una distribución similar a la de la bentonita inicial, siendo sodio el catión mayoritario, seguido del calcio, magnesio y potasio. En ambas celdas su distribución espacial sigue una tendencia similar a la de los cationes solubles, incrementando sus concentraciones hacia la zona del calentador y superando los niveles de referencia a partir de la mitad de la columna, excepto el sodio que se mantiene relativamente constante a lo largo de la columna, con solo un ligero aumento en la concentración cerca del calentador.

## REFERENCIAS

Villar, M.V., García-Herrera, G., Iglesias, R.J., Gutiérrez-Álvarez, C., Martín, P.L., Barcala, J.M. 2024. Thermo-hydraulic tests with Wyoming bentonite at high temperature (Project EURAD-HITEC). Informes Técnicos CIEMAT