

07.85.17

REPO-3



GERENCIA DE PROTECCION RADIOLOGICA Y SEGURIDAD

REPO-3

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº	AÑO
1	1985

CNEA-NT 23/85

EVOLUCION TEMPORAL DE UN MACIZO
GRANITICO BAJO CARGAS TERMICAS GENERADAS
POR PRODUCTOS DE FISION

Ventura, M.; Ferreri, J.C.**



COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
BUENOS AIRES - ARGENTINA

1985

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
GERENCIA DE PROTECCION RADIOLOGICA Y SEGURIDAD*

REPO-3

C.N.E. - Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº	AÑO
1	1985

CNEA-NT 23/85

EVOLUCION TEMPORAL DE UN MACIZO
GRANITICO BAJO CARGAS TERMICAS GENERADAS
POR PRODUCTOS DE FISION

Ventura, M.; Ferreri, J.C.**

* Casilla de Correo 40
1802 AEROPUERTO DE EZEIZA, Argentina

** Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET.

Buenos Aires

1985

INIS CLASSIFICATION AND KEYWORDS

E52.00

GRANITES
H CODES
HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES
RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL
REPOSITORIES(*)
ROCKS
THERMAL CONDUCTION
UNDERGROUND DISPOSAL

(*) Not shown in INIS Thesaurus 1985.

INDICE

	<u>Página</u>
1.- Introducción.	1
2.- Especificación del problema.	2
2.1 Propiedades físicas de los materiales.	2
2.2 Geometría del repositorio.	2
2.3 Condiciones de borde e iniciales.	4
3.- Modelos computacionales.	4
3.1 Programa de cálculo.	4
3.2 Aproximaciones al problema.	5
3.3 Resultados previos.	5
3.3.1 Especificación de un problema de ensayo.	5
3.3.2 Efecto de la discretización de la región, caso 2D.	7
3.3.3 Caso 3D.	11
3.3.4 Conclusiones de los cálculos previos.	15
4.- Resultados para el caso especificado.	15
4.1 Aproximación 2D.	15
4.1.1 Especificación del problema.	15
4.1.2 Máxima temperatura en el sistema.	19
4.1.3 Análisis de la historia térmica del repositorio.	19
4.2 Aproximación 3D.	22
4.2.1 Especificación del problema.	22
4.2.2 Máxima temperatura en el sistema.	25
4.2.3 Análisis de la historia térmica del repositorio.	25
4.3 Discusión de los resultados.	30
5.- Conclusiones y recomendaciones.	34
6.- Referencias.	36
Apéndice 1 Listado de entrada para el caso 2D.	37
Apéndice 2 Listado de entrada para el caso 3D.	39

RESUMEN

Se analiza el comportamiento térmico temporal de un macizo granítico bajo cargas térmicas generadas por los subproductos terminales del ciclo de combustible nuclear previsto en el programa nuclear argentino. Este sistema es denominado "repositorio".

El análisis se basa en la consideración de una celda unitaria representativa del centro del macizo, empleando el programa Heating 5.

Se efectúa un análisis preliminar para obtener criterios respecto a la precisión de los resultados en base a una aproximación bidimensional y otra tridimensional del problema. Se muestran curvas de evolución temporal de la temperatura en zonas de interés de la celda unitaria considerada. Bajo la carga térmica empleada, 500W por contenedor, se alcanza una temperatura máxima de 55°C en el borde del orificio de depósito de subproductos.

1. INTRODUCCION

Este informe presenta un análisis del comportamiento térmico de un macizo granítico bajo las cargas térmicas que generarían subproductos terminales del ciclo de combustible nuclear previsto por el Programa Nuclear Argentino. Este macizo sería el futuro repositorio de esos subproductos.

La predicción de la historia térmica de repositorios definitivos de subproductos de alto nivel de actividad específica ha sido el objeto de numerosos estudios recientemente. Estos son, en general, de dos tipos: semianalíticos y numéricos.

Los trabajos semianalíticos se basan en la obtención de la evolución temporal de la temperatura en base a aproximaciones del repositorio consistentes en superponer soluciones analíticas cerradas. Ejemplos típicos de este tipo de aproximación son los trabajos de Tin Chan et al. (1) y la referencia (2). Las limitaciones de este tipo de técnicas consisten básicamente en que no se consideran las variaciones de materiales en la zona y que, en general, el interior de la fuente de calor no es analizado. Entre las ventajas se puede mencionar que se considera, ver referencia (2), la totalidad de la zona del repositorio y el menor tiempo de cómputo.

Los trabajos numéricos consisten en la predicción de la evolución de la temperatura en base a discretizaciones del campo de integración. Trabajos típicos son los de Clairborne et al. (3) y el de la referencia (4). En el primero se efectúa una comparación de métodos numéricos aplicados a este problema y en el segundo se evalúa la historia térmica de un repositorio. Entre las limitaciones de este tipo de estudio debe citarse la imposibilidad de representar la totalidad de la geometría del repositorio, limitándose los estudios a la evaluación de la historia térmica de una celda unitaria, representativa generalmente de la zona media de aquel. Las ventajas son la posibilidad de considerar detalles (distintos materiales y la geometría local) y proveer una cota, en base a las condiciones de borde que se adoptan, para las máximas temperaturas a esperarse. En general la coincidencia entre ambas aproximaciones está en el orden del 5%.

Del estudio de Clairborne et al. (3) surge que el programa HEATING 5 (ver referencia 5 para su descripción) es uno de los más adecuados para este tipo de problema. Debido a esta razón y a que estaba disponible en CNEA, se decidió emplearlo para las predicciones numéricas, cuyos resultados resumen el presente informe.

En lo que sigue se indican las aproximaciones empleadas, los datos considerados y los resultados obtenidos en la evaluación de un repositorio.

Se muestran también algunos resultados previos que permitieron la familiarización con las posibilidades y limitaciones del programa. Naturalmente, los resultados dependen de los datos adoptados. Como base se tomaron los indicados en la revisión N° 0 del informe conceptual para el anteproyecto de ingeniería del estudio de factibilidad del repositorio de subproductos terminales del ciclo de combustible, referencia (6).

2. ESPECIFICACION DEL PROBLEMA

2.1. PROPIEDADES FISICAS DE LOS MATERIALES

Los materiales que se han considerado son tres: granito, una mezcla de arena con bentonita, y vidrio (borosilicato). Estos constituyen las diversas zonas del repositorio y sus propiedades fueron estimadas según lo indicado en la tabla 2.1.

	GRANITO	ARENA + BENTONITA	VIDRIO
$\rho \text{ Kg/m}^3$	2600	2242	3000
$C \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$	0,20	0,17	0,22
$K \frac{\text{kcal}}{\text{hm}^\circ\text{C}}$	2,58	1,70	0,94

Tabla 2.1.1. Propiedades de los materiales del repositorio

Estos valores constituyen aproximaciones basadas en la bibliografía.

2.2. GEOMETRIA DEL REPOSITORIO

Los resultados a ser mostrados están basados en una geometría del repositorio constituida por un doble peine de galerías, construidas a una profundidad constante, en las que los residuos están distribuidos uniformemente.

Como fuera mencionado anteriormente, la aproximación numérica empleada impide considerar la totalidad del repositorio; esto es debido, naturalmente, a limitaciones de memoria y tiempo de cómputo. Debido a ello es necesario considerar una celda representativa del repositorio y proveer condiciones de borde adecuadas para la integración.

Como celda unitaria se ha considerado la zona comprendida entre los planos que pasan por el centro de dos pilares consecutivos de galerías, entre los dos planos que pasan por el centro de la distancia entre sucesivos contenedores de residuos y por dos planos paralelos a la superficie de la tierra, uno sobre ésta y otro aproximadamente a 1000 metros de profundidad.

Si no se considera la ventilación en la galería, puede suponerse que la solución será simétrica respecto al plano que pasa por el centro del contenedor. Esto reduce a la mitad la zona de integración. Si además no se considera la pérdida de calor hacia las galerías laterales el problema es simétrico también respecto al plano que pasa por el eje de la galería. Esto reduce el problema a la integración sobre un cuarto de la celda original.

La figura 2.2.1 muestra la celda unitaria tridimensional (3D).

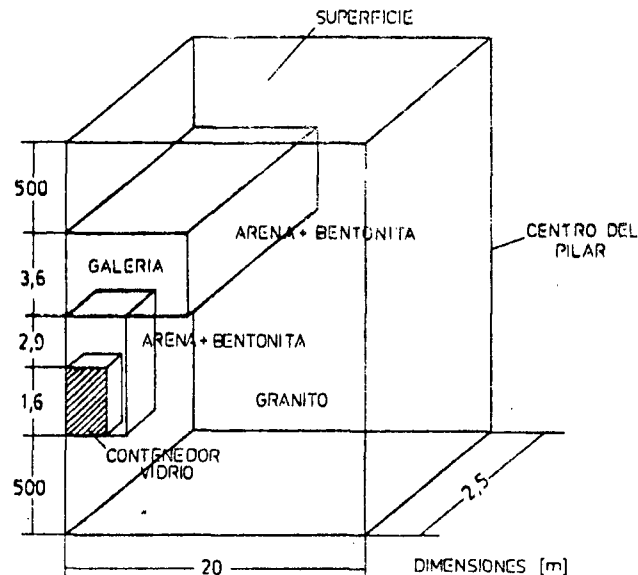


Figura 2.2.1. Celda Unitaria 3D.

Como se ve en la figura, se consideró que la galería está llena de arena más bentonita, en coincidencia con el estado final de la misma.

2.3. CONDICIONES DE BORDE E INICIALES

El conjunto de condiciones de borde debe ser compatible con las aproximaciones utilizadas. Para ello se consideró que sobre los planos verticales, vale una condición de borde adiabática, y que sobre los planos horizontales la temperatura es constante. Esto a su vez impone que el flujo de calor sea en la dirección vertical.

Sobre la superficie de la tierra se consideró una temperatura fija de $15,34^{\circ}\text{C}$ (coherente con una temperatura de 32°C a 500 m de profundidad y un gradiente geotérmico de $1^{\circ}\text{C}/30\text{ m}$). En el límite inferior del recinto se consideró que la temperatura era de $48,67^{\circ}\text{C}$ (a 1000 m de profundidad). Este límite inferior mostró ser suficientemente seguro pues las temperaturas no se modificaban notablemente a una profundidad de 700 m debido a la presencia del repositorio.

Como temperatura inicial de la celda se consideró la correspondiente al gradiente geotérmico. Esto daba una variación lineal entre los límites mencionados.

Es de notar que estas condiciones de borde permiten poner una cota superior a las temperaturas en el recinto de integración con respecto al caso real.

3. MODELOS COMPUTACIONALES

3.1. PROGRAMA DE CALCULO

Como ya fuera mencionado el programa que se utilizó es el Heating 5 (5), que es un programa apto para resolver problemas estacionarios y/o transitorios de conducción de calor en una, dos o tres dimensiones, en coordenadas cartesianas o cilíndricas.

Entre las características de este programa puede mencionarse que la conductividad, densidad y calor específico pueden depender del espacio y de la temperatura; la conductividad puede ser anisótropa; el régimen de generación de calor de las fuentes puede ser dependiente del tiempo, de la temperatura y de la posición y la temperatura del contorno puede ser dependiente del tiempo.

Las condiciones de contorno pueden ser temperaturas fijas, convección forzada, convección natural y radiación.

El espaciado de la grilla de cálculo puede ser variable a lo largo de cada eje, permitiendo un máximo de 100 regiones, 50 materiales y 50 condiciones de borde.

Para realizar el presente trabajo se hicieron algunos ajustes a dicho programa: se implementó para un número mayor de nodos en la grilla y se incluyeron dos subprogramas que no estaban originalmente.

3.2. APROXIMACIONES AL PROBLEMA

El tratamiento de la celda unitaria puede ser realizado en base a una aproximación tridimensional (3D) o bidimensional (2D). Esta última postula que no existe transmisión de calor en el sentido axial de la galería y permite estudiar cualitativamente la distribución de la temperatura en las cercanías de la fuente equivalente y con una buena aproximación la correspondiente a la zona más alejada de la misma. Como la aproximación 2D era menos costosa en tiempo de cómputo se decidió establecer con ella los criterios de discretización del recinto. En lo que sigue se presentan resultados previos que muestran algunas limitaciones de la solución obtenida, como una función de la discretización empleada.

3.3. RESULTADOS PREVIOS

3.3.1. Especificación de un problema de ensayo

Como ya fuera dicho, el programa permite además la obtención de la solución estacionaria de un problema. En nuestro caso está es el correspondiente a las condiciones de borde mencionadas y a una fuente igual a la correspondiente al estado inicial.

Para determinar el tipo de grilla más adecuado para el caso de interés se consideró un problema similar aproximado con el caso 2D. Para el caso estacionario la geometría utilizada está indicada en la figura 3.3.1.1. donde $X = 20$ m corresponde al centro del pilar. Como puede verse, en ell.

se han considerado diversas zonas, debido a los distintos materiales y a razones de conectividad entre regiones exigidas por el programa. Las coordenadas que delimitan las diversas regiones son las indicadas en la tabla 3.3.1.1. en las que además se muestra el material que la constituye. Las propiedades físicas de los materiales son las consideradas 2.1.

Para estos cálculos 2D debe considerarse una fuente equivalente a la del caso 3D. Se consideró un volumen de la fuente consistente en un paralelepípedo de 1 m de altura, 0,6 m de ancho y 4 m de longitud (que es la distancia que se consideró entre ejes de contenedores).

Para una potencia instalada por contenedor

$$P_C = 20,79 \frac{\text{Kcal}}{\text{h kg óxidos}} \times 34,7 \text{ kg óxidos} = 721 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}},$$

resultaba, entonces, una potencia específica

$$Q_0 = \frac{721}{0,6 \times 1 \times 4} \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^3} = 300,5 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^3}$$

Se consideró que la fuente decaía según una ley de atenuación exponencial de la forma:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-2,28 \times 10^{-6}t},$$

estando t expresado en horas.

3.3.2. Efecto de la discretización de la región, caso 2D

La simulación del estado estacionario para un repositorio ficticio permitió la determinación económica de la discretización más adecuada para el problema.

En la figura 3.3.2.1. se han indicado con A, B y C tres puntos característicos de la zona en estudio. Están representados, además, un conjunto de líneas adicionales (líneas de paso grueso en la nomenclatura del programa). En lo que sigue se indica el efecto de la subdivisión de cada zona entre líneas de paso grueso (los que constituyen las líneas de paso fino en la misma nomenclatura).

Para determinar cuál era el número más adecuado de subdivisiones de la grilla se optó por variar, dentro de lo razonable, el número de aquellas en las distintas zonas, indicadas con L1 a L9 en la figura 3.3.2.1.

Para las divisiones según y se mantuvo el número de subdivisiones constante que indica la figura 3.3.2.1. en la columna Sy.

Los cálculos de ensayo se separaron en dos partes: los correspondientes a una densificación de la zona externa a la fuente y su aislación y los correspondientes a una densificación conjunta de ambas zonas.

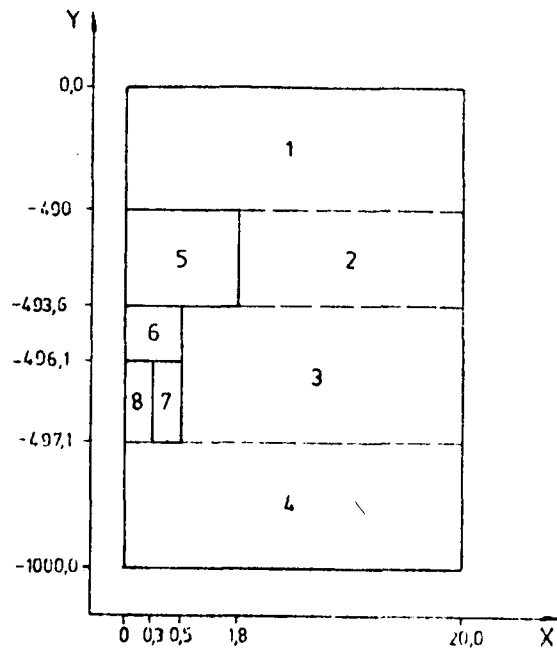


Figura 3.3.1.1. Regiones para un caso típico, aproximación 2D

Zona	X min	X max	y min	y max	Material
1	0,0	20,0	-490,0	0,0	Granito
2	1,8	20,0	-493,6	-490,0	Granito
3	0,5	20,0	-497,1	-493,6	Granito
4	0,0	20,0	-1000,0	-497,1	Granito
5	0,0	1,8	-493,6	-490,0	Bentonita
6	0,0	0,5	-496,1	-493,6	Bentonita
7	0,3	0,5	-497,1	-496,1	Bentonita
8	0,0	0,3	-497,1	-496,1	Vidrio

Tabla 3.3.1.1. Coordenadas y materiales para las regiones de la figura 3.3.1.1.

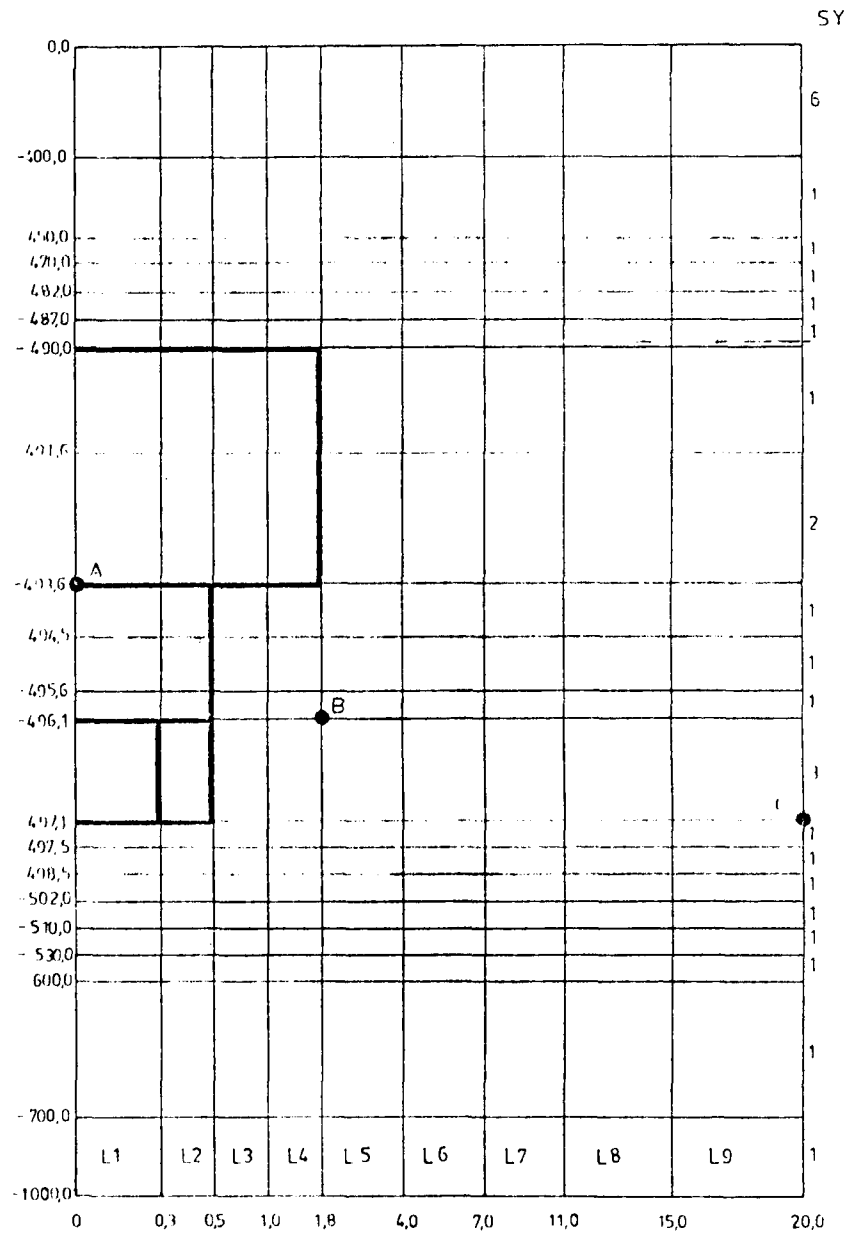


Figura 3.3.2.1. Grilla básica para los cálculos previos en un repositorio ejemplo.

La tabla 3.3.2.1. muestra los resultados obtenidos para el caso estacionario en los puntos A, B y C, juntamente con una indicación de las subdivisiones en las zonas L1 a L9 y el número total de nodos de cálculo.

C	Nodos	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	T _A	T _B	T _C
1	341	2	1	1	1	1	1	1	1	1	77	82	64
2	558	2	1	2	2	2	2	2	2	2	119	124	103
3	775	2	1	3	3	3	3	3	3	3	58	64	46
4	928	2	1	4	4	4	4	4	4	4	54	59	43
5	580	2	1	3	3	2	2	2	2	2	59	64	47
6	609	2	1	5	4	3	2	1	1	1	55	61	44
7	594	3	2	5	2	2	1	1	1	1	44	50	37
8	621	3	2	5	5	3	1	1	1	1	46	52	37
9	696	4	2	5	5	3	1	1	1	1	44	50	37
10	870	4	2	6	5	3	2	2	2	2	45	51	37
11	870	4	2	4	4	3	3	3	3	3	53	59	42
12	812	4	2	5	5	3	2	2	2	2	43	49	36

Tabla 3.3.2.1. Temperaturas en los puntos A, B y C en función del número de subdivisiones en el eje X

Como puede verse en la tabla, si se mantiene constante el número de subdivisiones en las zonas L1 y L2 (2 y 1 respectivamente), ulteriores refinamientos de la zona externa no cambian significativamente los resultados. Una excepción lo constituye el caso C7, pero puede argumentarse que las subdivisiones elegidas no son razonables pues la zona más próxima a la fuente no está coherentemente discretizada.

Cuando se incrementa el número de puntos en la zona de la fuente los resultados varían en forma notable.

Es razonable pensar que los valores obtenidos en el caso 8, con 621 nodos son aceptables. Es interesante notar que en la referencia (3) se emplearon 640 nodos para un caso similar y como esto era de particular importancia para la factibilidad de los cálculos 3D se decidió modificar la estructura de la grilla en el sentido y, manteniendo constante la distribución según X.

La tabla 3.3.2.2. resume algunos resultados obtenidos.

C	NODOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	T _A	T _B	T _C
13	483	3	2	5	5	3	1	1	1	1	43	48	36
14	484	3	2	5	5	2	1	1	1	1	43	48	36
15	550	4	2	5	5	3	2	1	1	1	43	48	36
16	616	4	2	5	5	3	2	2	2	2	43	48	36

Tabla 3.3.2.2. Resumen de corridas con menor detalle en y

Como puede verse en la tabla 3.3.2.2., los valores no se modifican por la reducción de 21 líneas gruesas a 15. Esto es importante pues permite considerar el caso 3D como factible, según se verá más adelante.

La distribución de líneas de la grilla y su subdivisión para este caso es la indicada en la figura 3.3.2.2.

No se consideró imprescindible graficar la solución obtenida para estos casos, dejándose ello para el caso definitivo.

Como conclusión de estas corridas de prueba, puede decirse que la grilla correspondiente al caso C12 con 812 nodos es adecuada para el caso 2D. Como el caso 3D es, naturalmente, más realista, podrá emplearse una nodalización más gruesa en el plano xy, en la confianza de representar adecuadamente el fenómeno al incorporar la dimensión z.

3.3.3. Caso 3D

En base a lo visto en 3.3.2. se determinó una discretización razonable en el plano xy, constituido por 484 nodos, que es la correspondiente al caso C14 de la tabla 3.3.2.2. Esta discretización en xy fue combinada con la discretización en Z, considerando cinco planos de nodos según esta dirección.

Antes de entrar en los detalles de esta red de nodos es conveniente especificar las regiones consideradas. La figura 3.3.3.1. muestra la numeración de las regiones, mientras que la tabla 3.3.3.1. indica los materiales y coordenadas límites de las mismas.

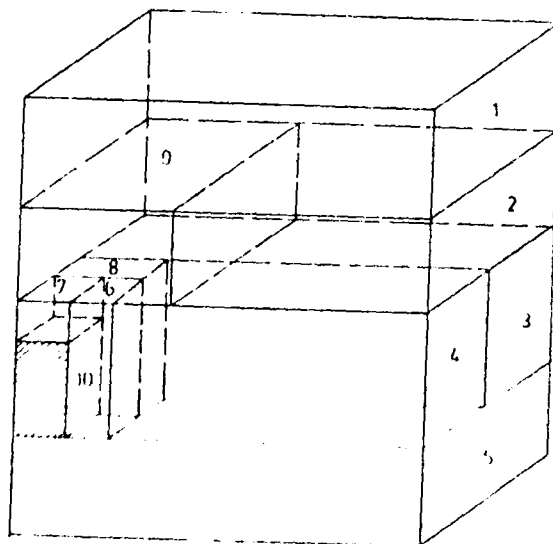


Figura 3.3.3.1. Regiones consideradas en la celda 3D.

Zona	X min	X max	y min	y max	Z min	Z max	Material
1	0,0	20,0	-490,0		0,0	2,0	Granito
2	1,8	20,0	-493,6	-490,0	0,0	2,0	Granito
3	0,0	20,0	-497,1	-493,6	0,5	2,0	Granito
4	0,5	20,0	-497,1	-493,6	0,0	0,5	Granito
5	0,0	20,0	-1000,0	-497,1	0,0	2,0	Granito
6	0,3	0,5	-497,1	-493,6	0,0	0,3	Bentonita
7	0,0	0,3	-496,1	-493,6	0,0	0,3	Bentonita
8	0,0	0,5	-497,1	-493,6	0,3	0,5	Bentonita
9	0,0	1,8	-493,6	-490,0	0,0	2,0	Bentonita
10	0,0	0,3	-497,1	-496,1	0,0	0,3	Vidrio

Tabla 3.3.3.1. Coordenadas extremas y materiales de las distintas regiones para el caso 3D.

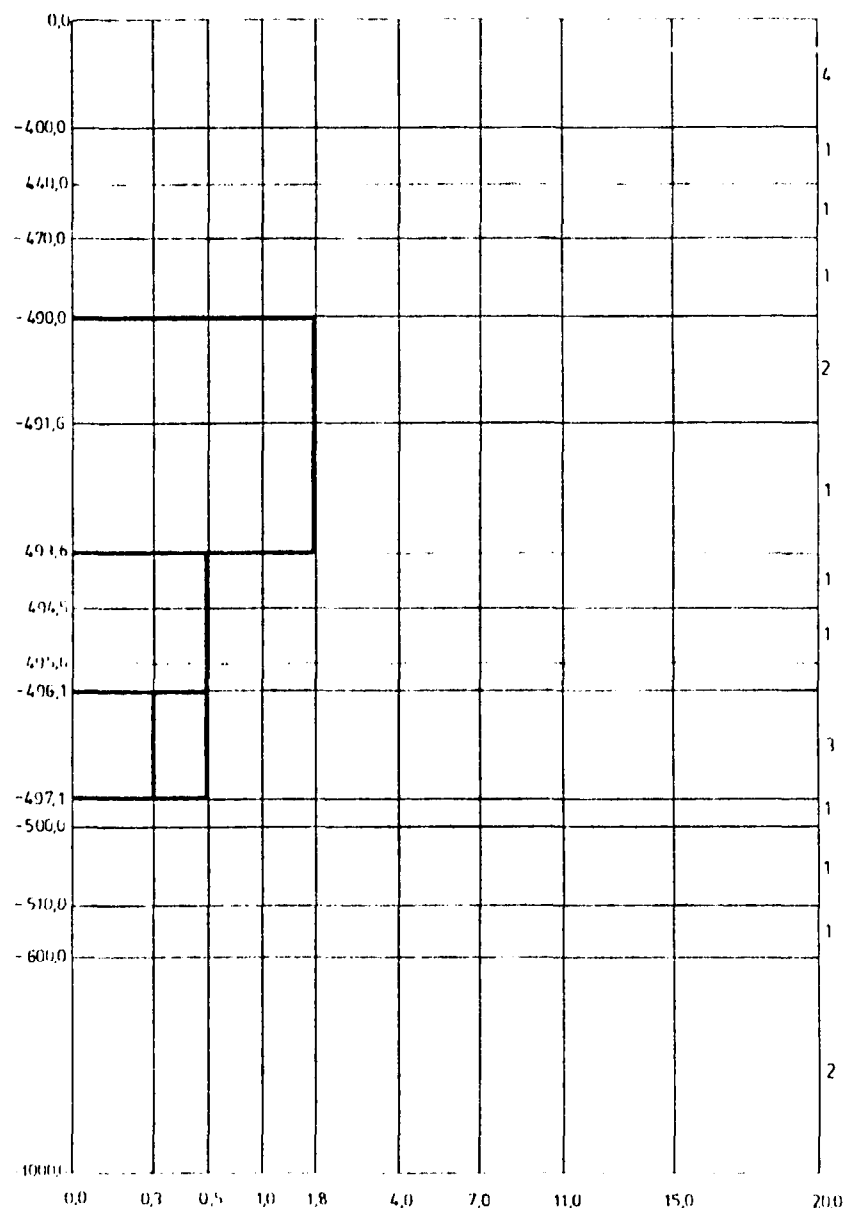


Figura 3.3.3.2. Grilla 2D con 15 líneas gruesas según y

La densidad de potencia por celda, en este caso, resulta de considerar la potencia total de

$$721 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

uniformemente distribuida en el volumen de $0,6 \times 0,6 \times 1,0 \text{ m}^3$. Es decir que:

$$Q_0 = 2004 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^3}$$

Analogamente que en el caso 2D se consideró una función de decaimiento temporal, de forma que la fuente es:

$$Q = Q_0 e^{-2,28 \times 10^{-6}t},$$

con t expresado en horas.

La figura 3.3.3.2. indica algunos detalles de la grilla considerada. Esta es coincidente con la C14 del caso 2D para $Z = 0$. Las divisiones en el sentido Z están mostradas en dicha figura, al igual que el número de subdivisiones.

Como puede verse el número de subdivisiones según Z es sensiblemente diferente del correspondiente según X. Esto impone algunas limitaciones que serán discutidas más adelante. La tabla 3.3.2.2. muestra los resultados obtenidos en los puntos A, B y C para el caso C14 (2D) y los correspondientes al caso 3D para $Z = 0$.

C	TIPO	NODOS	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	T _A	T _B	T _C
14	2D	484	3	2	5	5	3	1	1	1	1	43	48	36
14*	3D	2420	3	2	5	5	3	1	1	1	1	42	49	34

Tabla 3.3.3.2: Comparación de cálculos con el modelo 2D y 3D

3.3.4. Conclusiones de los cálculos preliminares

En lo anterior se mostró que los cálculos son posibles para dos aproximaciones del problema, a saber, la bidimensional y la tridimensional. Ambas están basadas en la consideración de celdas unitarias, representativas de una zona del repositorio en las cercanías de su centro geométrico. La consideración de esta celda unitaria hace conservativos los resultados obtenidos, debido a las condiciones de borde adoptadas.

Los resultados 2D y 3D se aproximan razonablemente entre sí en los puntos considerados como representativos, aún cuando pueden (y deben) existir diferencias localizadas mayores que las mostradas, en función del distinto tipo de aproximación. La comparación de resultados será considerada con más detalle en lo que sigue.

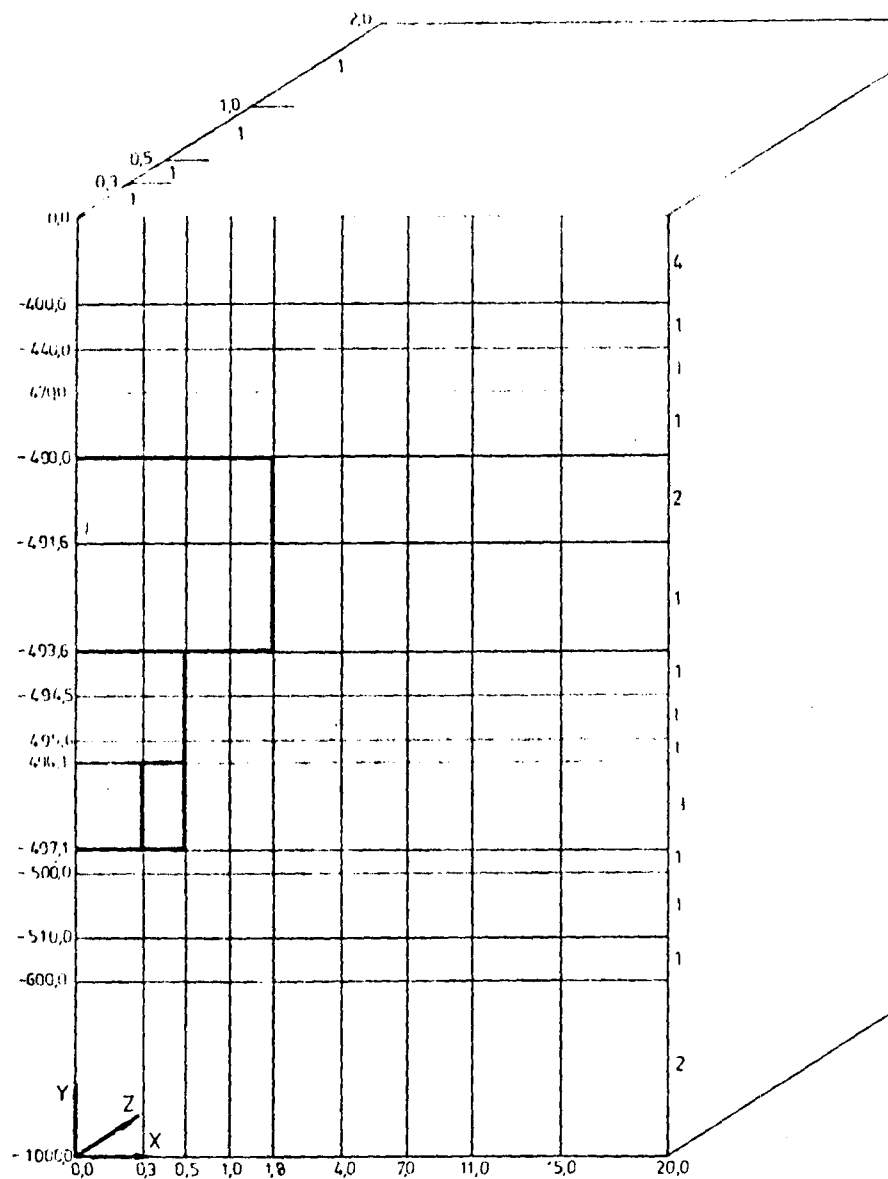


Figura 3.3.1.3 Grilla 3D empleada para los cálculos previos

4. RESULTADOS PARA EL CASO ESPECIFICADO

4.1. APROXIMACION 2D DEL PROBLEMA

4.1.1. Especificación

Las condiciones generales (condiciones de borde, tipo de grilla, número de zonas, propiedades físicas de los materiales...) son las mismas que fueron descriptas en 3.3.1.

Las dimensiones de los contenedores, así como la distancia entre dos contiguos y la potencia por contenedor han variado respecto al problema ensayo.

La geometría utilizada está indicada en la figura 4.1.1.1. Las coordenadas que delimitan las diversas regiones son las indicadas en la tabla 4.1.1.1 en donde se muestra el material que las constituye.

Zona	X min	X max	y min	y max	Material
1	0,0	20,0	-489,0	0,0	Granito
2	1,8	20,0	-492,6	-489,0	Granito
3	0,5	20,0	-497,1	-492,6	Granito
4	0,0	20,0	-1000,0	-497,1	Granito
5	0,0	1,8	-492,6	-489,0	Bentonita
6	0,0	0,5	-495,5	-492,6	Bentonita
7	0,3	0,5	-497,1	-495,5	Bentonita
8	0,0	0,3	-497,1	-495,5	Vidrio

Tabla 4.1.1.1 Coordenadas y materiales correspondientes problema especificado

El volumen de la fuente equivalente para este caso 2D, es el correspondiente al paralelepípedo de 1.6 m de altura, 0.6m de ancho y 5 m de longitud (que es la distancia que en este problema se consideró entre ejes de contenedores).

La potencia considerada por contenedor es de $p_C = 430 \text{ Kcal/h}$ lo que da una potencia específica de

$$Q_0 = \frac{430}{1,6 \times 0,6 \times 5} \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^3} = 89,58 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^3}$$

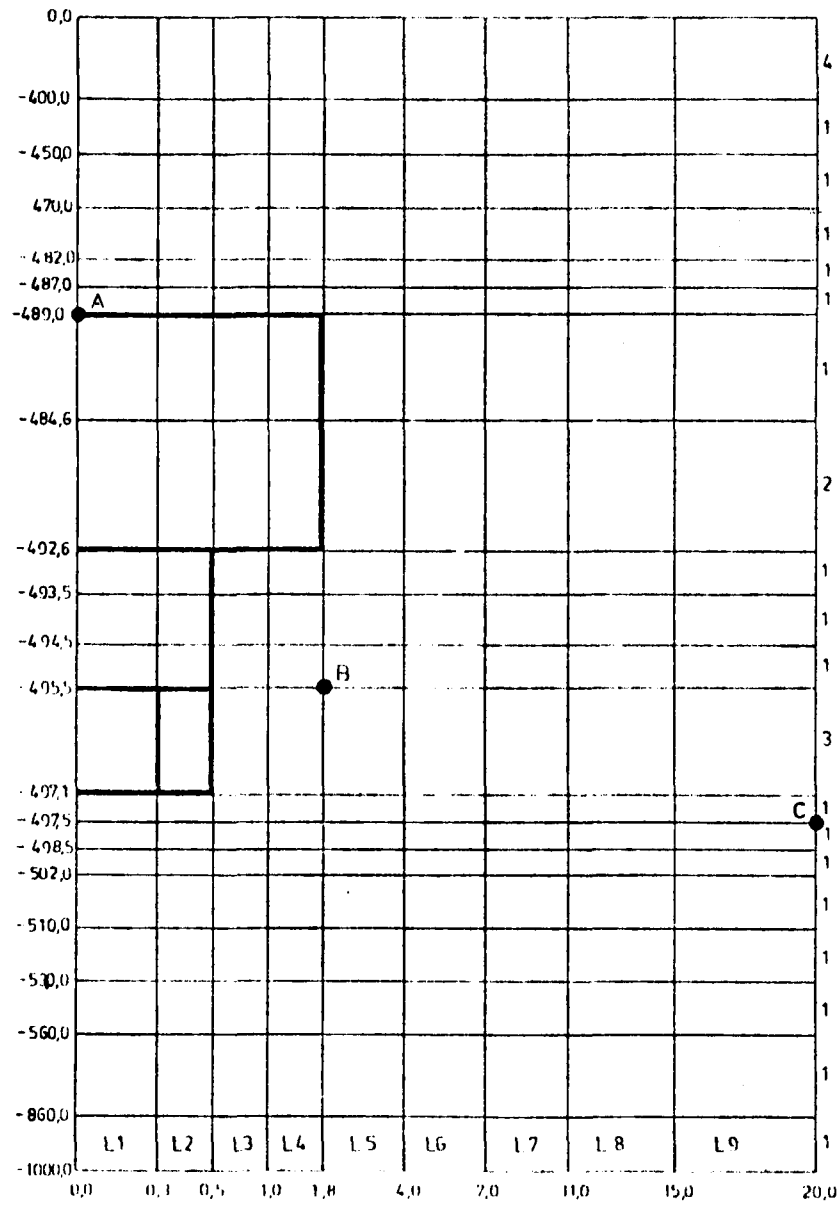


Figura 4.1.1.1. Grilla básica para los cálculos en el repositorio especificado

La ley de decaimiento de la fuente fue tomada como

$$Q = 12,39 e^{-2,28 \times 10^{-6}t}$$

con t expresado en horas.

La discretización considerada coincide con la descrita en 3.3.2. La tabla 4.1.1.2 contiene algunos resultados obtenidos con 21 líneas gruesas en y , y la tabla 4.1.1.3 muestra resultados obtenidos con 15 divisiones en y . Los puntos A, B, y C en que se tomaron las temperaturas están señaladas en la figura 4.1.1.1.

C	Nodos	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	T_A	T_B	T_C
17	756	4	2	5	5	3	2	2	2	2	36	39	34
18	729	4	2	5	5	2	2	2	2	2	36	39	34
19	594	3	2	5	5	2	1	1	1	1	36	40	34

Tabla 4.1.1.2 Resumen de corridas con 21 líneas en y , con distinto detalle en x

C	Nodos	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	T_A	T_B	T_C
20	612	4	2	5	5	3	2	2	2	2	36	39	34
21	484	3	2	5	5	2	1	1	1	1	34	38	33

Tabla 4.1.1.3 Resumen de corridas con 15 líneas en y , con distinto detalle en x

Como en el problema ensayo, se ve que a este nivel de discretización, los resultados no cambian apreciablemente. Se optó, finalmente, por la nodalización C18.

Se efectuó la integración del caso 2D hasta $t = 20$ años y los resultados obtenidos se analizan en lo que sigue.

4.1.2. Máxima temperatura del sistema

La temperatura alcanza su valor máximo en el interior de la fuente. Como este no es un parámetro de interés, para este nivel de discretización, no será considerado en lo que sigue.

Naturalmente es de importancia establecer cual es la temperatura máxima que se alcanza en la roca. A esta temperatura se llega en la interfase del orificio de llenado y el granito y su valor es de $T = 51,0^{\circ} \text{C}$. Se obtiene en el punto de coordenadas $x = 0,5$ y $y = -496,0$ para $t=11,0$ años. Es decir que el sobrecalentamiento máximo en el sistema es $\Delta T = 19,1^{\circ} \text{C}$. El valor correspondiente al estado estacionario es $\Delta T = 12,9^{\circ} \text{C}$.

4.1.3. Análisis de la historia térmica del repositorio

La figura 4.1.3.1 ilustra la variación de la temperatura, como función de la profundidad y en función del tiempo, para el caso 2D. Se ha elegido la línea de punto que pasa por $x = 0,5$. Obviamente sólo se ha considerado la parte del sistema que es de mayor interés. En esta figura se muestra el perfil de temperatura inicial y los perfiles sucesivos cada 5 años.

Como puede verse la temperatura se incrementa bruscamente en los primeros cinco años pero luego los aumentos son menos bruscos. Esto se debe a la difusión del calor en la roca circundante.

La figura 4.1.3.2 muestra la evolución temporal del incremento de la temperatura, con respecto al valor inicial, como una función del tiempo para dos puntos de interés. El máximo se alcanza para $t \approx 11$ años sobre la interfase. Esta variación debe ser considerada con precaución, pues la aproximación 2D no es estrictamente válida en las cercanías de la fuente. Como puede verse en dicha figura la temperatura no se incrementa por encima de $19,2^{\circ}\text{C}$ en la roca.

Otra zona de interés la constituyen los pilares de las galerías; la figura 4.1.3.3 muestra la variación temporal de la temperatura en el centro del pilar. Como puede verse las variaciones son más suaves que anteriormente. Naturalmente el máximo se alcanzará mucho más tardíamente que en los puntos ubicados en las cercanías de la fuente y por ello no puede precisarse en dicha figura. No se intentó proseguir los cálculos más allá de 20 años con esta aproximación.

4.2. APROXIMACION 3D DEL PROBLEMA

4.2.1. Especificación

La especificación general coincide con lo señalado en 3.3.3. Las regiones consideradas son las de la figura 3.3.3.1 y en la tabla 4.2.1.1 se indican los materiales y coordenadas que limitan las mismas.

La densidad de potencia por celda, en este caso, resulta de tomar la potencia total de 430 Kcal/h distribuída uniformemente en el volumen del paralelepípedo de $0,6 \times 0,6 \times 1,6 \text{ m}^3$.

O sea que:

$$Q_0 = 746,5 \frac{\text{Kcal}}{\text{hm}^3}$$

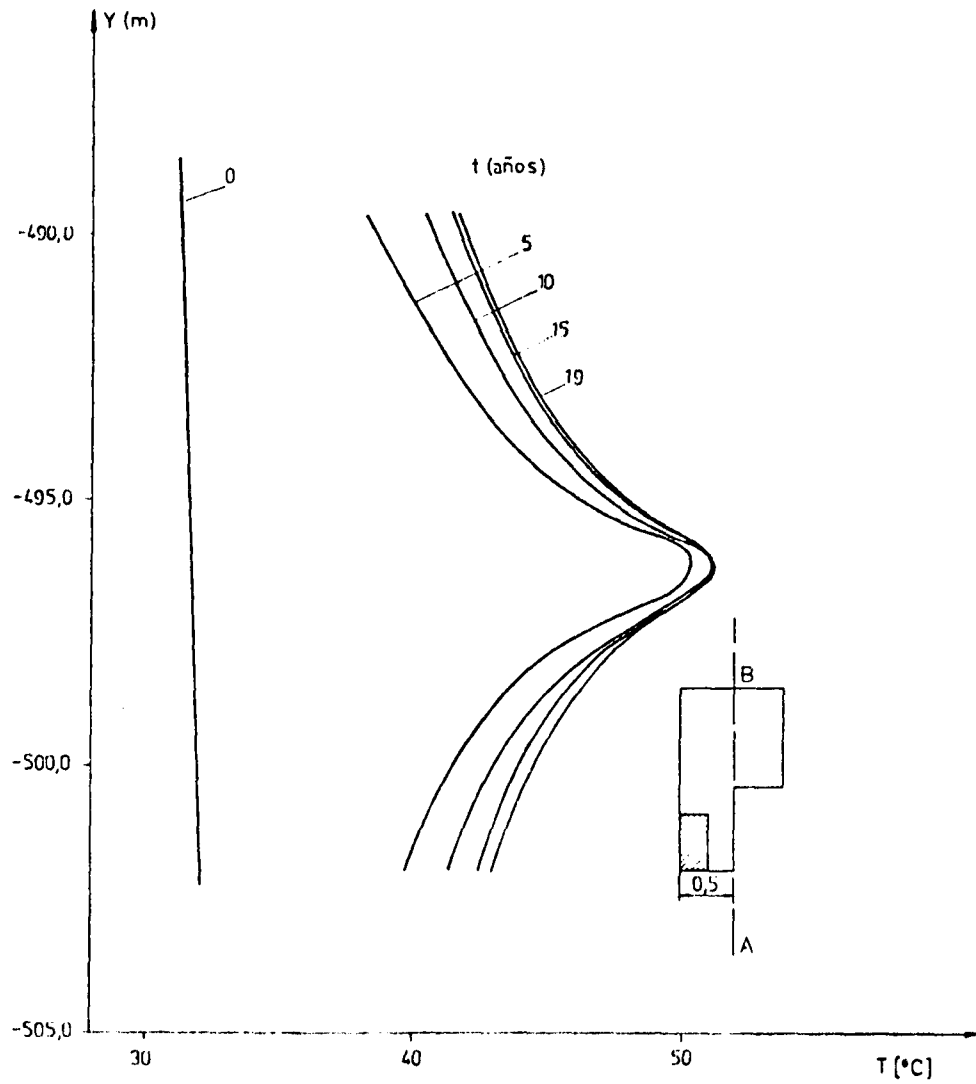


Figura 4.1.3.1. Variación temporal de la temperatura en función de la profundidad. línea AB-caso 2D, $x = 0,5$

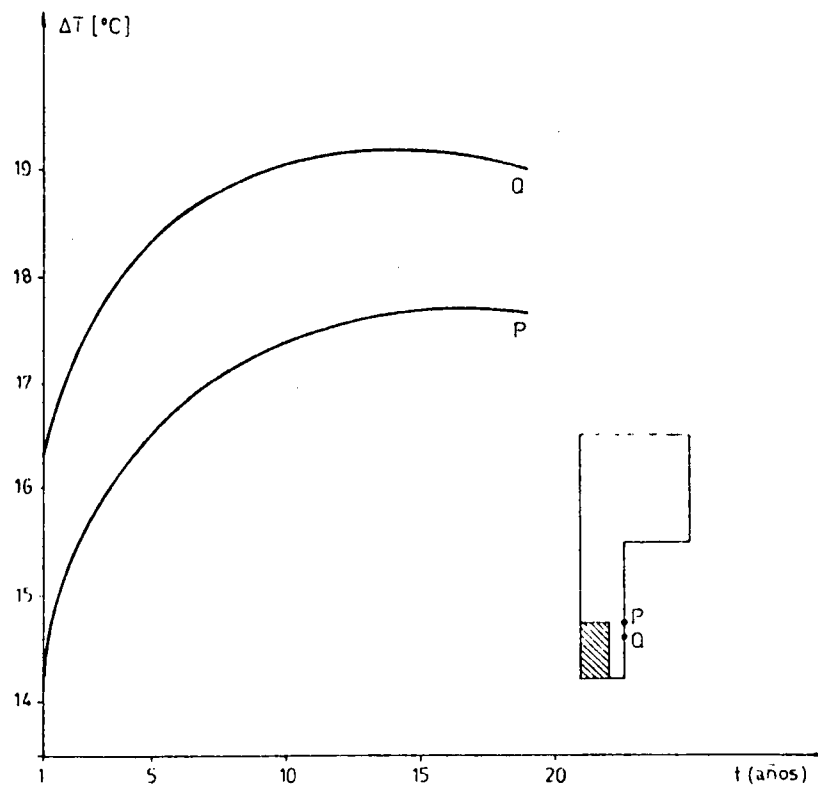


Figura 4.1.3.2. Variación temporal de la temperatura para los puntos $P(0,5;-495,5)$, $Q(0,5;-496,0)$ caso 2D.

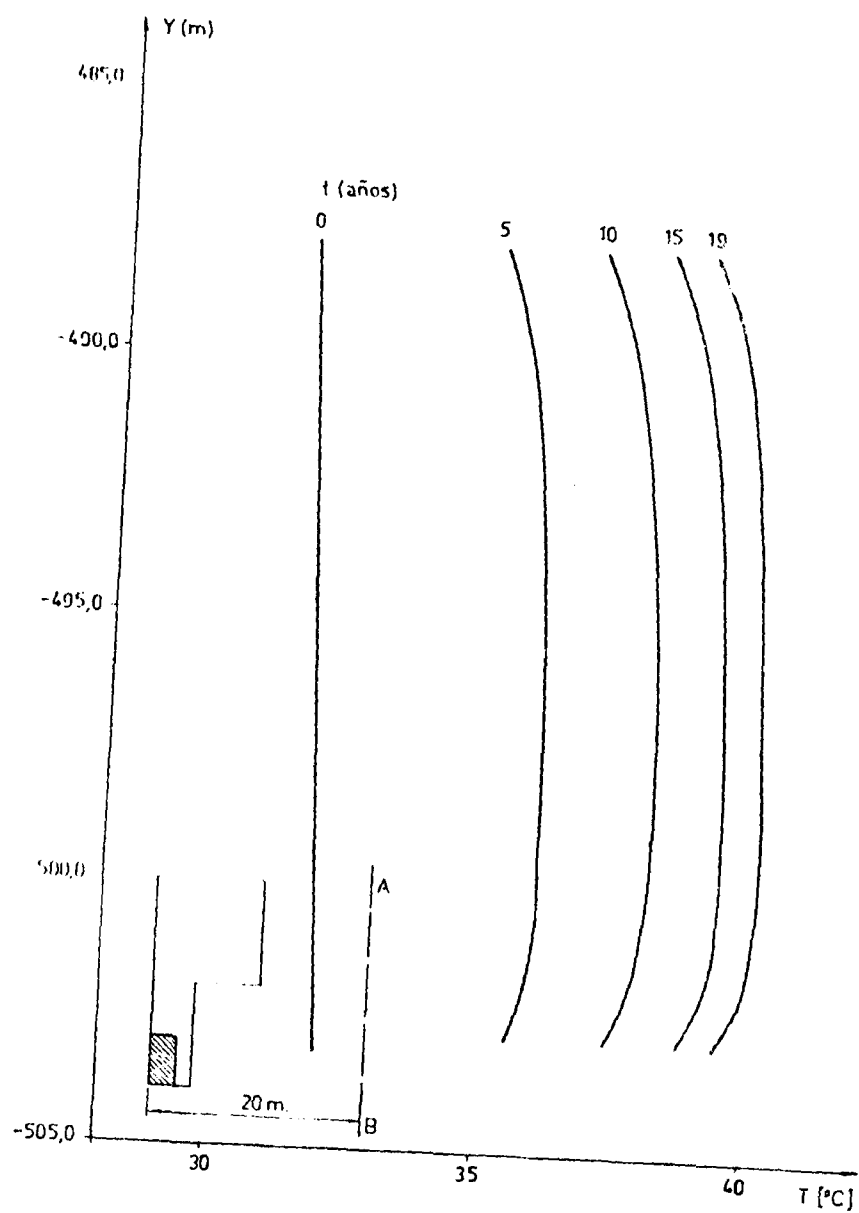


Figura 4.1.3.3. Variación temporal de la temperatura en el centro del pilar, línea AB-caso 20

Como en el caso bidimensional, se consideró una función de decaimiento temporal, de forma que la fuente es:

$$Q = 12,39 e^{-2,28 \times 10^{-6}t}$$

con t expresado en horas.

Zona	X min	X max	y min	y max	Z min	Z max	Material
1	0,0	20,0	-489,0	0,0	0,0	2,5	Granito
2	1,8	20,0	-492,6	-489,0	0,0	2,5	Granito
3	0,0	20,0	-497,1	-492,6	0,5	2,5	Granito
4	0,5	20,0	-497,1	-492,6	0,0	0,5	Granito
5	0,0	20,0	-1000,0	-497,1	0,0	2,5	Granito
6	0,3	0,5	-497,1	-493,6	0,0	0,3	Bentonita
7	0,0	0,3	-495,5	-492,6	0,0	0,3	Bentonita
8	0,0	0,5	-497,1	-492,6	0,3	0,5	Bentonita
9	0,0	1,8	-492,6	-489,0	0,0	2,5	Bentonita
10	0,0	0,3	-497,1	-495,5	0,0	0,3	Vidrio

Tabla 4.2.1.1 Coordenadas y materiales correspondientes al problema especificado

En cuanto a la discretización, se consideró necesario mantener el mismo número de divisiones según x y z ya que teniendo el problema similar escala espacial en esas dos direcciones, no existía una razón a priori para diferenciarlas.

En la tabla 4.2.1.2 se muestran algunos resultados variando el N° de divisiones en x y z y manteniendo 15 divisiones en y.

C	Nodos	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	T _A	T _B	T _C
22	1452	1	1	2	1	1	1	1	1	1	38	42	33
23	1848	1	2	2	1	1	1	1	1	1	38	42	32
24	2288	1	2	2	2	1	1	1	1	1	39	43	32

Tabla 4.2.1.2 Resumen de corridas con 15 líneas en y, e igual discretización en x y z.

Debido al número de nodos y a los valores obtenidos para las temperaturas en los puntos considerados, se consideró adecuado el C23, con 1848 nodos.

En la figura 4.2.1.1 se muestra la discretización tomada en este caso y se indican los puntos A, B y C, en donde se han analizado las temperaturas.

4.2.2. Máxima temperatura del sistema

Como en el caso 2D, la temperatura máxima de la roca se produce en la interfase del orificio de llenado y la roca. Dicha temperatura es $T = 55.5^{\circ}\text{C}$ y se obtiene en el punto de coordenadas $x = 0,5$; $y = -496,0$, para $t \approx 6$ años. El sobrecalentamiento máximo en el sistema es $\Delta T = 23,7^{\circ}\text{C}$ y el valor correspondiente al estado estacionario es $\Delta T = 22,3^{\circ}\text{C}$.

4.2.3. Análisis de la historia térmica del sistema

La figura 4.2.3.1 muestra la variación de la temperatura como función de la profundidad y en función del tiempo para el caso 3D. La zona que se considera es la misma que en el caso 2D y están representados el perfil de temperatura inicial y los sucesivos cada 5 años.

La figura 4.2.3.2, muestra la evolución temporal del incremento de la temperatura, con respecto al valor inicial, como una función del tiempo para tres puntos de interés. Se ve que el máximo se halla sobre la interfase para $t \approx 6$ años y la temperatura se incrementa a lo sumo en $\approx 23^{\circ}\text{C}$ en la roca.

También se analizó lo que sucede en los pilares de las galerías. La figura 4.2.3.3, ilustra la variación temporal de la temperatura en el centro del pilar.

El máximo, no se ha alcanzado, en el tiempo considerado, de aproximadamente 20 años.

En la figura 4.2.3.4, se muestra la distribución de temperatura para dos planos horizontales o la altura del piso de la galería y del borde superior de la fuente respectivamente y para $t \approx 6$ años.

La simetría que se verifica es razonable, debido a las diferencias en la difusión en ambas direcciones.

4.3. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En los párrafos anteriores se presentaron los resultados para un repositorio especificado. Ellos se obtuvieron mediante dos aproximaciones diferentes, la 2D y la 3D. Discutiremos primeramente las diferencias existentes entre ambas nodalizaciones.

La figura 4.3.1.1 muestra una comparación cruzada de los valores obtenidos en los puntos, A, B y C. Como puede verse las temperaturas son similares con un máximo apartamiento del orden de 1°C en 35°C .

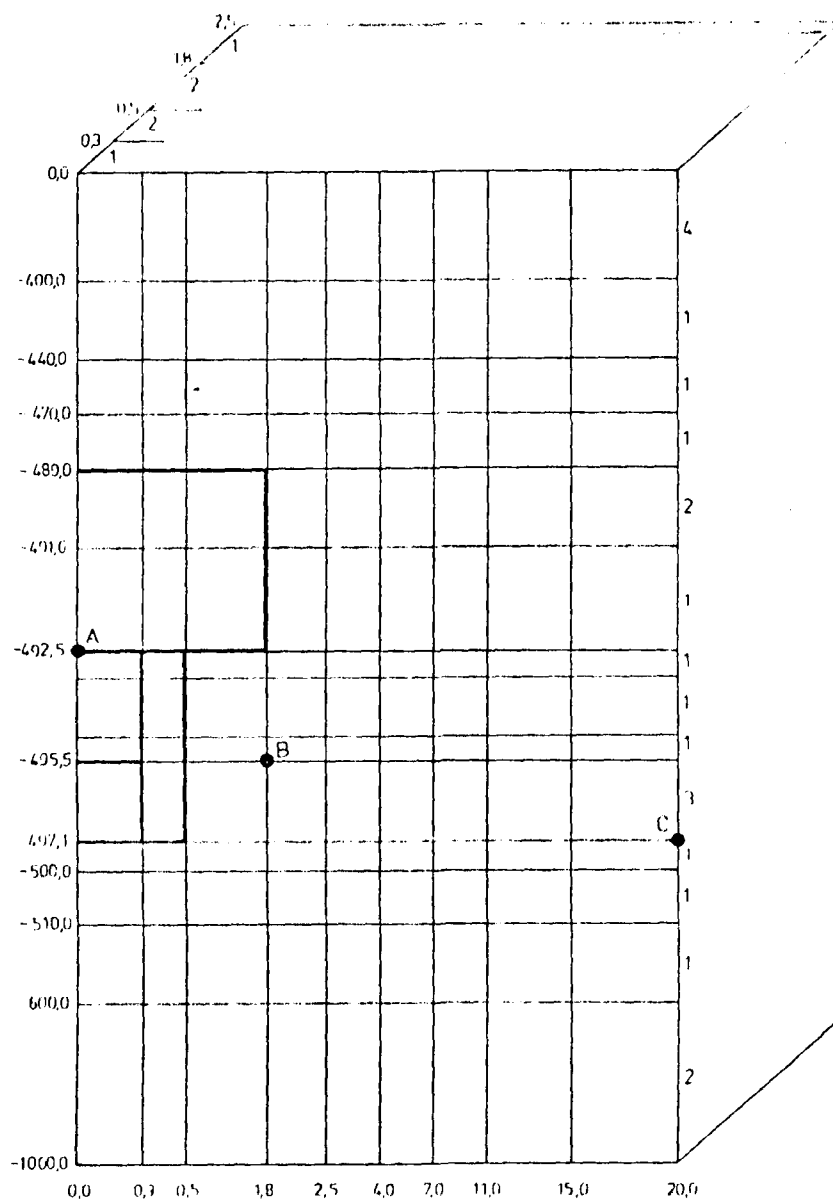


Figura 4.2.1.1. Grilla utilizada para el caso especificado 3D

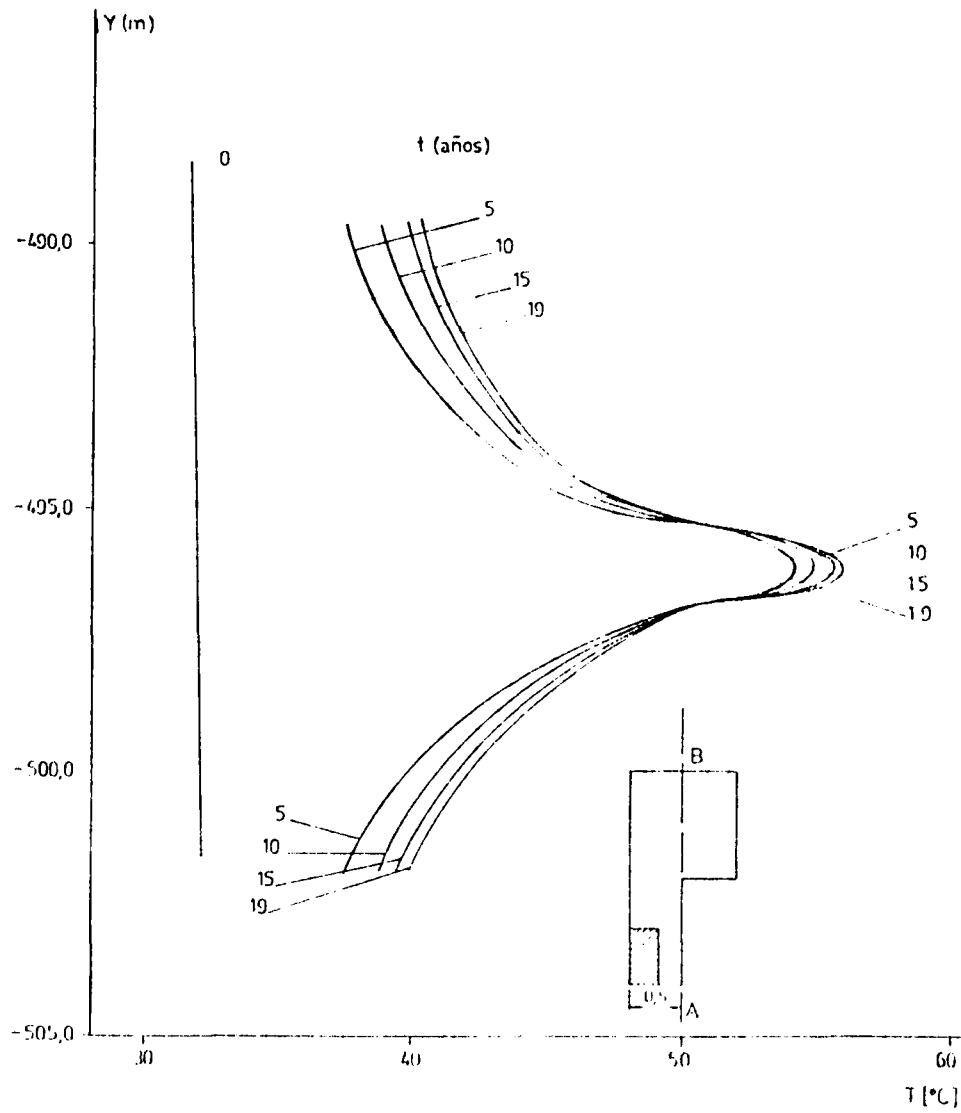


Figura 4.2.3.1. Variación temporal de la temperatura en función de la profundidad, líneas AB. $z = 0$, $x = 0,5$, caso 3D

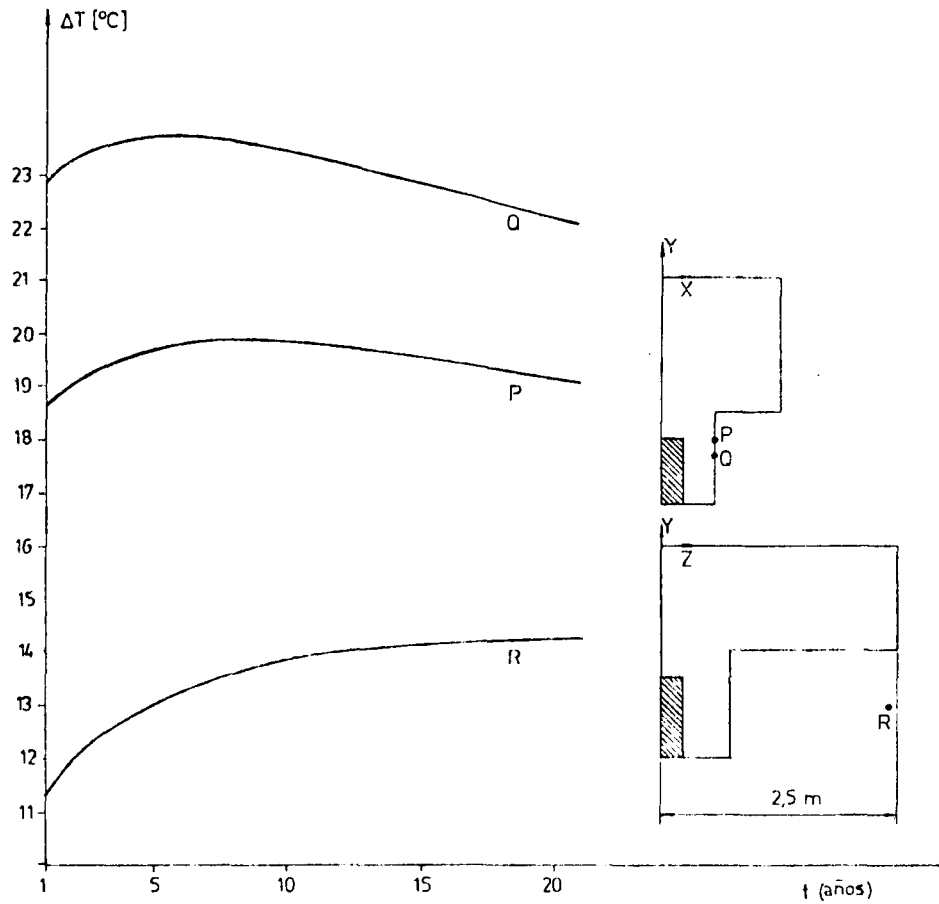


Figura 4.2.3.2. Variación temporal de la temperatura para los puntos $P(0,5;-495,5)$, $Q(0,5;-496,0)$ $R(0,0;-496,0;2,5)$ para el caso 3D.

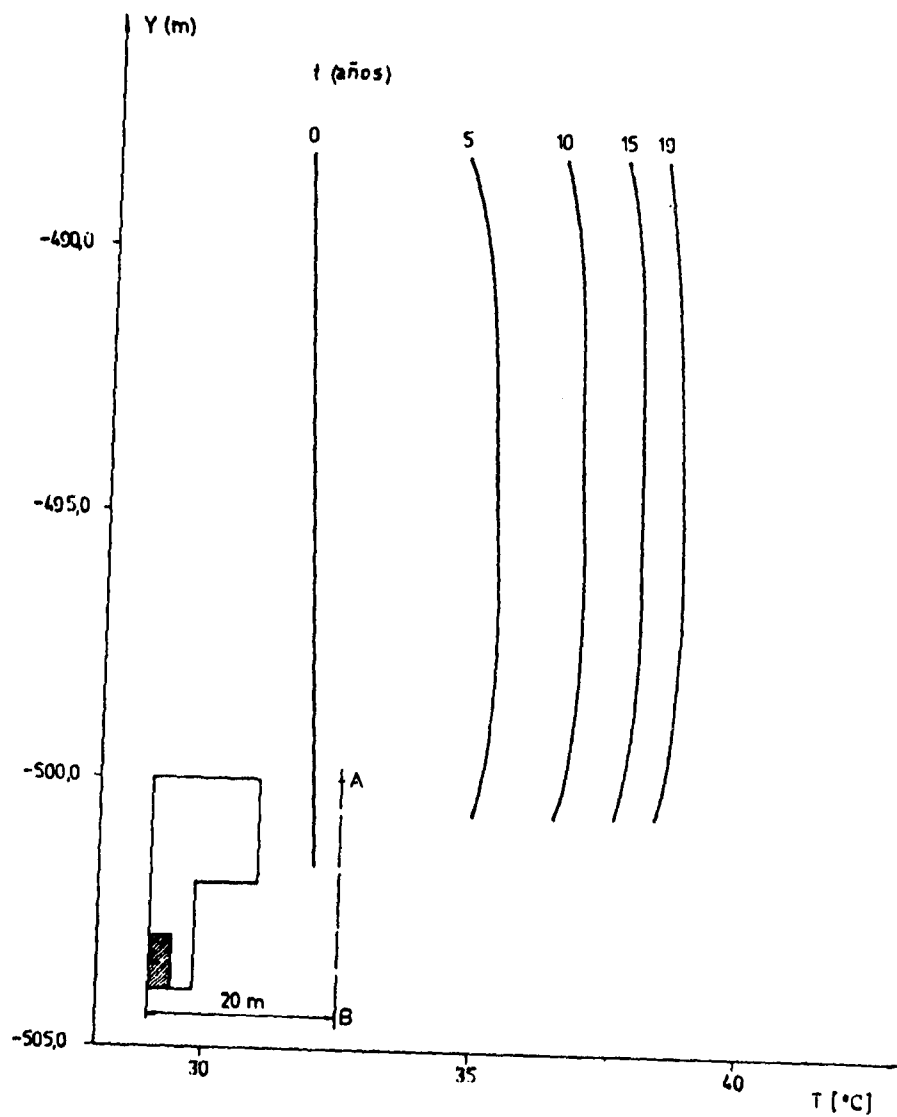


Figura 4.2.3.3. Variación temporal de la temperatura en el centro del pilar. línea AB . $Z = 0$ caso 3D

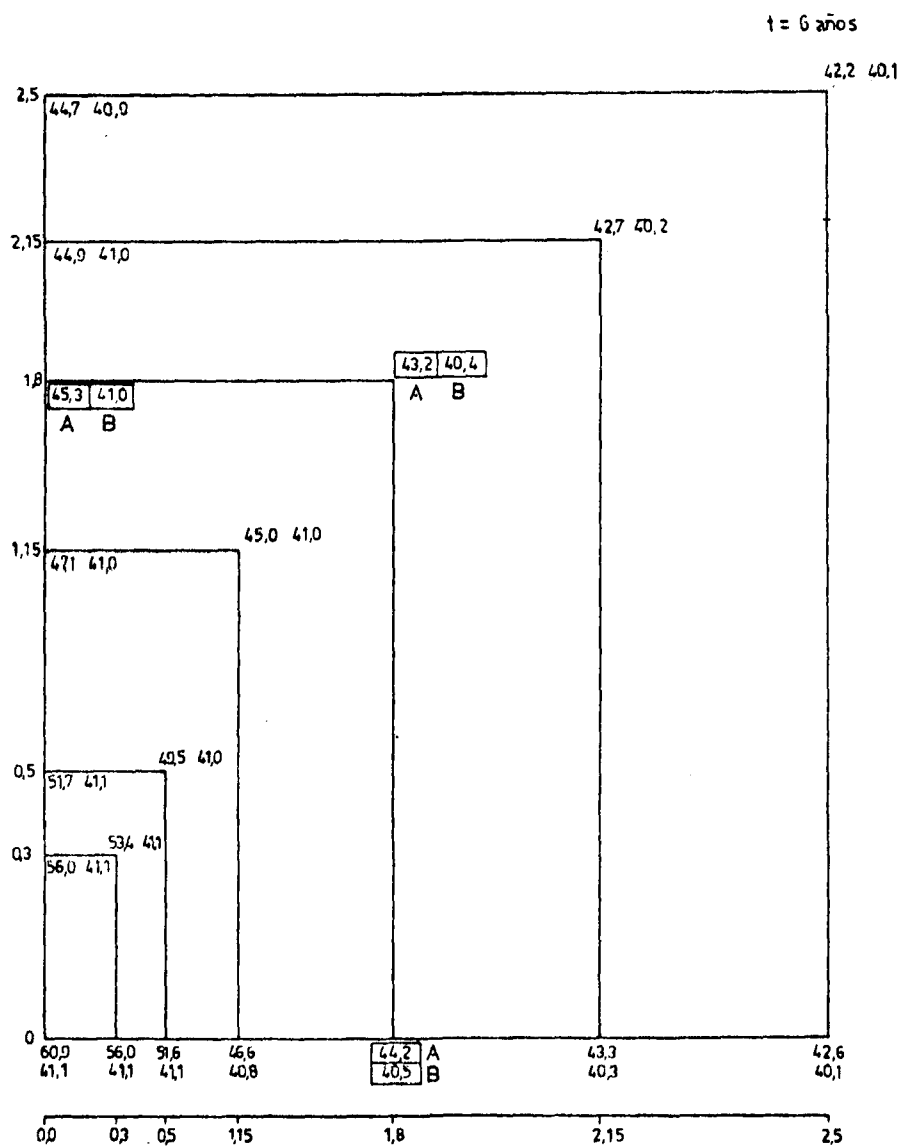


Figura 4.2.3.4. Distribución de temperatura en dos planos
xz a la altura de los puntos: y = -492,6 e
y = -496,0 caso 3D.

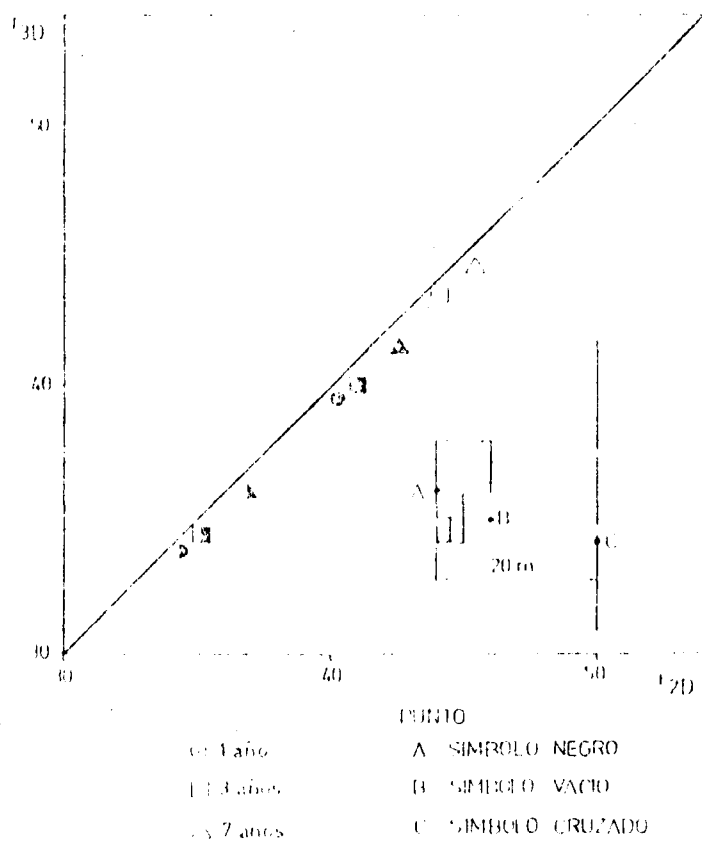


Figura 4.3.1.1. Comparación entre los resultados del modelo 2D y 3D

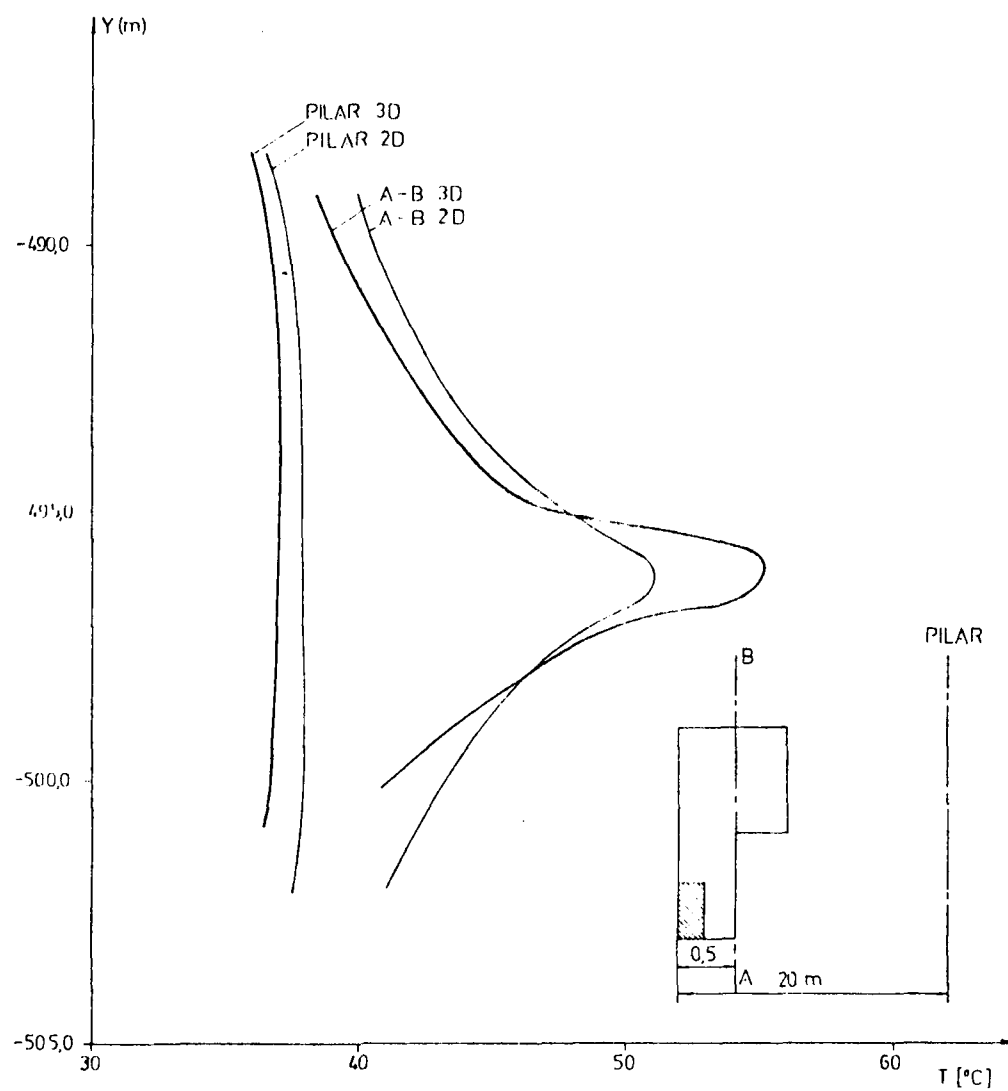


Figura 4.3.1.2. Comparación de temperaturas, caso 2D y 3D

La figura 4.3.1.2 muestra la variación de la temperatura con la profundidad para una línea cercana a la fuente y para el centro del pilar en los casos 2D y 3D. En el último caso la variación es para $z = 0$. Como puede verse aquí también el apartamiento no es demasiado notable, aunque es mayor que en el caso anterior.

Debe tenerse en cuenta que si bien los cálculos 3D son más seguros, existe una limitación en el sentido que la geometría adoptada debido al programa, no es una representación demasiado adecuada en la inmediata vecindad de la fuente. Lo mismo podría decirse de la aproximación 2D.

Es importante notar que se ha considerado una condición representativa del estado final del repositorio (esto es con las galerías bloqueadas con arena y bentonita) y ello altera la historia térmica del mismo.

El máximo apartamiento de la temperatura con respecto al valor inicial es $23,7^{\circ}\text{C}$ en el caso 3D y $19,1^{\circ}\text{C}$ en el caso 2D. En ambos casos, como es natural, el máximo está en la interfase a la altura de la fuente. En el caso, 3D la temperatura es mayor debido a la distinta definición de la grilla adoptada. El máximo absoluto de la temperatura es $T = 55,5^{\circ}\text{C}$ en el caso 3D.

En el caso 3D, el valor máximo de la temperatura en la roca se alcanza a los 6 años de evolución, mientras que para el caso 2D, se la alcanza a los 11 años.

Esto puede deberse a que en el caso 2D, la difusión que puede tener el calor es mucho menor que en el caso 3D.

En ambos casos el punto donde se encuentra la máxima temperatura es el mismo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para la potencia especificada por contenedor (500W), la temperatura máxima en la roca muestra un apartamiento con respecto al valor inicial del orden de 24°C .

Esto implica que se está dentro de la limitación impuesta por el diseño que es no superar los 60°C en la roca.

Debe considerarse que la condición estudiada en el repositorio no corresponde a la inicial, por ello debieran efectuarse estudios que incluyeran una condición de galería vacía. Esto es doblemente importante pues dicha condición define la posibilidad de trabajar durante el llenado sin necesidad de proveer ventilación forzada y además permite verificar si el nuevo estado de carga térmica será soportado por el macizo rocoso.

Es necesario, además, efectuar un estudio paramétrico de la influencia de las propiedades de transporte de la roca debido a la falta de certeza respecto a los mismos. En el supuesto de que fuera necesario proveer ventilación forzada debería incluirse en este estudio el efecto de los coeficientes de convección.

Los resultados mostrados en este trabajo representan adecuadamente la evolución global del repositorio especificado. Si por razones de diseño se requiere una mayor definición en zonas en particular, deberían considerarse otras discretizaciones.

REFERENCIAS

- 1.- Chan, T.; Cook, N.G.W y Tsang, C.F. "Theoretical Temperature fields for the Stripa Heater Project". Berkeley (USA), Lawrence Berkeley Lab., Sep. 1978. LBL-7082. 221 p.
- 2.- Kaiser Engineers, Oakland, CA (USA). "Finite-length line source superposition model (FLLSSM)". Mar. 1980. ONWI-94. 106 p.
- 3.- Clairborne, H.C.; Wagner, R.S. y Just, R.A. "A comparison of the results of several heat transfer computer codes when applied to a hypothetical nuclear waste repository". Oak Ridge Nat. Lab., TN (USA), dec. 1979. ORNL/TM-7112. 69 p.
- 4.- Science Applications, Inc., Oak Ridge, TN (USA). "Thermal operations conditions in a National Waste terminal storage facility". Sep. 1976. Y/OWI/-SUB-76/47950. 49 p.
- 5.- Turner, W.D.; Elrod, D.C. y Siman-Tov, I.I. "Heating 5- An IBM 360 Heat Conduction Program". Oak Ridge Nat. Lab., TN (USA), 1977. ORNL/CSD/TM-15
- 6.- Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires (Argentina). Gerencia de Protección Radiológica y Seguridad. "Informe conceptual para el anteproyecto de ingeniería del estudio de factibilidad del repositorio de los subproductos terminales del ciclo de combustible". CNEA, Rev.0, 1981.

APENDICE 1

En este apéndice se incluye el listado de datos correspondientes al caso 2D. La versión del programa permite hasta 2500 nodos como máximo.

Los valores que toma la coordenada y, en los gráficos se obtienen restando 2000.0 a las coordenadas y, que están indicadas en el listado.

```

//ZSNOR20 JOB (0480171,405),'FEFFER1 JUAN CARLOS',MSGCLASS=V,CLASS=M
// EXEC FORTXLG
//LKED.SYSPRINT DD SYSOUT=L
//LKED.HEATF DD DSN=L04801.HEATING.LKFOPT,DISP=(OLD,KEEP),
// UNIT=3350,VOL=SEF=CNEA03
//LKED.HEAT DD DSN=L04801.HEATING.LKASEMB,DISP=(OLD,KEEP),
// UNIT=3350,VOL=SEF=CNEA03
//LKED.SYSIN DD *
  INCLUDE HEATF
  INCLUDE HEAT(I,CLK,IDAY,TIME,ICOMPA,INTBCD,MODEL)
/*
//GC.FT06F071 DD SYSOUT=A
//GC.SYSIN DD *

```

SIMULACION REPOSITORIO, CASO BIDIMENSIONAL

10	7	8	3	1	2	2	CARD2
21			2				CARD3
6							CARD4
2	1000	0.001	1.7			0.0 200000.0	CARD5
1	1	0.0	20.0	1511.00	2000.00		R1
1							R2
2	1	1.0	20.0	1507.40	1511.00		R1
1							R2
3	1	0.5	20.0	1502.90	1507.40		R1
1							R2
4	1	0.0	20.0	1000.00	1502.90		R1
1							R2
5	2	0.0	1.8	1507.40	1511.00		R1
1							R2
6	2	0.0	0.5	1504.50	1507.40		P1
1							R2
7	2	0.3	0.5	1502.90	1504.50		R1
1							R2
8	3	0.0	0.3	1502.90	1504.50		R1
2	1						R2
1	GRANITE	2.58	2600.00	0.20			M
2	AREABENT	2.15	2245.93	0.17			M
3	FUENTE	0.94	3000.00	0.20			M
1	89.58	2					G
1	1.0		1				I
2	100.0						I
1	2	15.33					B1
2	2	48.07					B2
							B1
							B2
0.0	0.3	0.5	1.0	1.8	4.0	7.0	L1
15.0	20.0						L1
4	2	5	5	2	2	2	N1
2							N1
1000.00	1300.00	1400.00	1470.00	1490.00	1499.00	1501.50	L2
1502.90	1504.50	1505.50	1506.50	1507.40	1510.40	1511.00	L2
1518.00	1530.00	1550.00	1600.00	2000.00			L2
1	1	1	1	1	1	1	N2
3	1	1	1	2	1	1	N2
1	1	1	4				N2
1	2						A1
1	82.00	2	-0.03333				A2
2	2						A1
6	1.0	7	-2.280-06				A2
360.0		2160.00					IP
							TP

```

/*
//

```

APENDICE 2

En este apéndice se incluye el listado de datos correspondientes al caso 3D.

Los valores que toma la coordenada y, en los gráficos se obtienen restando 2000,0 a las coordenadas y, que están indicadas en el listado.

```

//ZSNDR3D JOB (0480101,405),*FEBRERI JUAN CARLOS*,MSGCLASS=V,CLASS=M
// EXEC FORTXLG
//LKED.SYSPRINT DD SYSOUT=Z
//LKED.HEAT DD DSN=LO4801.HEATING.LKASENH,DISP=(OLD,KEEP),
// UNIT=3350,VOL=SER=CNFA02
//LKED.HEATF DD DSN=LO4801.HEATING.LKFEHT,DISP=(OLD,KEEP),
// UNIT=3350,VOL=SER=CNFA03
//LKED.SYSIN DD *

```

```

INCLUDE HEATF
INCLUDE HEATFICLK,IPAY,TIME,ICINPA,ITRCD,MODEL
/*

```

```

//GO.FTG6F001 DD SYSOUT=A
//GO.SYSIN DD *

```

SIMULACION REPOSITORIUM - CASO TRIDIMENSIONAL-

10	6	10	3	1	2	2	CARD2
24	15	5	2				CARD3
							CARD4
							CARD5
2	1000	0.001	1.7		0.0	200000.0	R1
1	1	0.0	20.0	1511.00	2000.00	0.0	R2
1					1		R1
2	1	1.8	20.0	1507.40	1511.00	0.0	R2
1							R1
3	1	0.0	20.0	1502.90	1507.40	0.5	R2
1							R1
4	1	0.5	20.0	1502.90	1507.40	0.0	R2
1							R1
5	1	0.0	20.0	1000.00	1502.90	0.0	R2
1							R1
6	2	0.3	0.5	1502.90	1507.40	0.0	R2
1							R1
7	2	0.0	0.3	1504.50	1507.40	0.0	R2
1							R1
8	2	0.0	0.5	1502.90	1507.40	0.3	R2
1							R1
9	2	0.0	1.8	1507.40	1511.00	0.0	R2
1							R1
10	3	0.0	0.3	1502.90	1504.50	0.0	R2
2	1						R1
1	GRANITO	2.58	2600.00	0.20			M
2	ARE+BENT	2.15	2245.93	0.17			M
3	FUENTE	0.94	3000.00	0.20			M
1	746.53	2					G
1	1.0		1				I
2	100.0						I
1	2	15.13					B1
							B2
2	2	48.67					B1
							B2
0.0	0.3	0.5	1.8	2.5	4.0	7.8	L1
15.0	20.0						L1
1	1	2	2	1	1	1	N1
1							N2
1000.00	1400.00	1450.00	1500.00	1502.90	1504.50	1504.90	L2
1507.40	1508.40	1511.00	1530.00	1560.00	1600.00	2000.00	L2
2	1	1	1	3	1	1	N2
1	2	1	1	1	4		N2
0.0	0.1	0.5	1.8	2.5			L3
1	1	2	2				N3
1	2						A1
1	82.00	2	-0.03333				A2
2	2						A1
6	1.0	1	-2.28E-6				A2
							IP
360.0		2160.0					TP

```

/*
//

```


- REP01 - Beninson, D.; Migliori de Beninson, A.
"Radiological impact of radioactive waste management"
- REP02 - Lucero Michaut, H.
"Aplicación de la geoestadística a la resolución de problemas estructurales en macizos rocosos homogéneos"
- REP03 - Ventura, M.; Ferreri, J.C.
"Evolución temporal de un macizo granítico bajo cargas térmicas generadas por productos de fisión"
- REP04 - Ventura, M.; Ferreri, J.C.
"Evolución temporal de un macizo granítico bajo cargas térmicas generadas por productos de fisión (estudio paramétrico)"
- REP05 - Beninson, D.
"Radioactive emissions and radiation exposures resulting from nuclear power production"
- REP06 - Beninson, D.; Lindell, B.
"Application of ICRP recommendations to radioactive waste isolation"
- REP07 - Migliori de Beninson, A.; Cancio, D.
"Impacto radiológico de la gestión de residuos radiactivos del Programa Nuclear Argentino"
- REP08 - Migliori de Beninson, A.; Palacios, E.
"Política en materia de gestión de desechos y su aplicación en Argentina"
- REP09 - Palacios, E. y otros.
"Bases conceptuales para la construcción de un repositorio en la Argentina"
- REP010- Palacios, E. y otros.
"Estudios para la selección del emplazamiento de un repositorio en Argentina"
- REP011- Matar, J.A.; Girardi, J.P.; Sarquis, M.A. M. de
"Aplicación de técnicas geoestadísticas al estudio de una formación granítica destinada a la construcción de un repositorio"
- REP012- Ferreri, J.C.; VENTURA, M.
"Numerical aspects of the study of the regional thermal impact of a radioactive waste repository"
- REP013- Ferreri, J.C.; Caballero, C.H.
"Difusión de calor a partir de una fuente plana rectangular finita"
- REP014- Beninson, D.; González, A.J.
"Radiological protection criteria for radioactive waste repositories"
- REP015- Palacios, E.; Ferreri, J.C.
"Marco conceptual para el desarrollo de los modelos de predicción de los efectos locales de un repositorio de residuos radiactivos de alta actividad"
- REP016- Ferreri, J.C.; Ventura, M.
"Aspectos numéricos del modelado de los efectos locales de un repositorio de residuos radiactivos de alta actividad"
- REP017- Beninson, D.
"Criterios de radioprotección en el caso de eventos disruptivos probabilísticos"
- REP018- Ferreri, J.C.; Grandi, G.
"Models for the study of the local effects produced by a high-level radioactive waste repository"

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Gerencia Protección Radiológica y Seguridad

	Domicilio Postal Postal Address	Télex	Facsimil	Teléfono
Sede Central (Main Headquarters)	Av. Libertador 8250 1429 - Buenos Aires Argentina	21388 PREAT AR	701 - 2431 (Int. 248) (ext. 248)	701 - 2431
Centro Atómico Ezeiza Ezeiza Atomic Center	Casilla de Correo 40 1802 - Aeropuerto Ezeiza Argentina	18079 CAE AR	620 - 0480	620 - 0160