



# GEOTERMIA

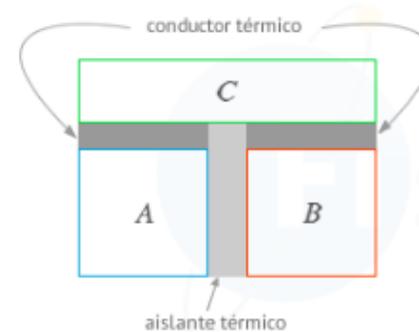
Catedra de Geofísica UNPSJB

Néstor Acosta, Germán Guerra, Alejo Agüero, Luis Chelotti.

# Introducción: Termodinámica

Los tres principios de la termodinámica definen cantidades físicas fundamentales (temperatura, energía y entropía) que caracterizan a los sistemas termodinámicos.

- Principio cero de la termodinámica: Si dos sistemas están en equilibrio térmico independientemente con un tercer sistema, deben estar en equilibrio térmico entre sí.



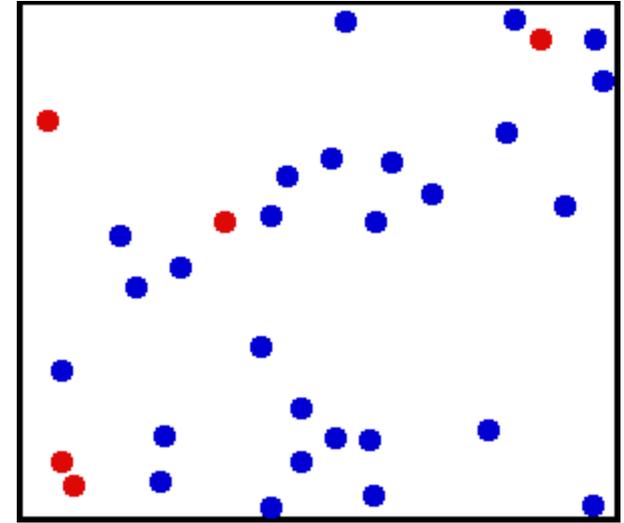
- Primer principio de la termodinámica: Un sistema aislado puede intercambiar energía con su entorno en forma de trabajo y de calor, acumulando energía en forma de energía interna. Este principio es una generalización del principio de conservación de la energía.

- Segundo principio de la termodinámica: La entropía del universo siempre tiende a aumentar

# Introduction: Temperatura y Calor

La temperatura es la medida de la energía cinética promedio de las moléculas, es decir, una cuantificación de la actividad molecular de la materia en un cierto sistema.

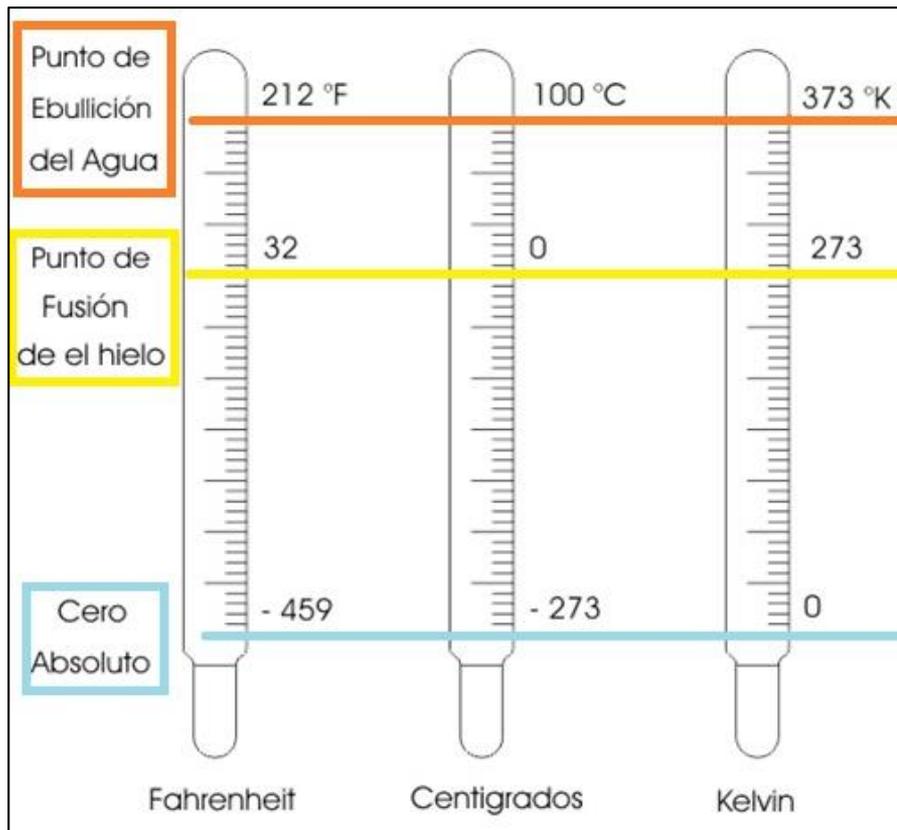
El principio está destinado a permitir la existencia de un parámetro empírico, la temperatura, como una propiedad de un sistema.



La temperatura es una magnitud estadística, por lo que no podemos medirla directamente. Para medirla hacemos uso de diversas magnitudes que varían con ella, como por ejemplo la altura de una columna de mercurio, la resistencia eléctrica o el volumen y la presión de un gas. A estas magnitudes, se las denomina **magnitudes termométricas**.

El término calor, por tanto, se debe de entender como transferencia de calor y solo ocurre cuando hay diferencia de temperatura y en dirección de mayor a menor. De ello se deduce que no hay transferencia de calor entre dos sistemas que se encuentran a la misma temperatura.

**Sistema Internacional de Unidades (SI)** El kelvin (K) es la unidad de medida del SI.



**Grado Celsius** (°C). Para establecer una base de medida de la temperatura **Anders Celsius** (en 1742) utilizó los puntos de fusión y ebullición del agua. Se considera que una mezcla de hielo y agua que se encuentra en equilibrio con aire saturado a 1 atm está en el punto de fusión. Una mezcla de agua y vapor de agua (sin aire) en equilibrio a 1 atm de presión se considera que está en el punto de ebullición.

El Kelvin (**K**) es la unidad de **temperatura** de la escala creada por **William Thomson Kelvin**, en el año 1848, sobre la base del **grado Celsius**, estableciendo el punto cero en el **cero absoluto** ( $-273,15\text{ °C}$ ) que es la temperatura mas baja que se pueden observar en laboratorio y haciendo que todos los valores de temperatura sean positivos.

# Tabla de temperaturas termodinámicas

$$\overline{E}_t = \frac{3}{2} nRT$$

Energía de un partícula y la frecuencia de su onda electromagnética asociada.

$$E = hf$$

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

	kelvin	Celsius	Emisión de pico longitud de onda <sup>2</sup> de fotones de cuerpo negro
Cero absoluto (preciso por definición)	0 K	-273,15 °C	∞
Un milikelvin (preciso por definición)	0,001 K	-273,149 °C	2,897 77 metros (Radio, Banda FM) <sup>3</sup>
Punto triple (VSMOW) (preciso por definición)	273,16 K	0,01 °C	10 608,3 nm (Longitud de onda larga I.R.)
Punto de ebullición del agua <sup>A</sup>	373,1339 K	99,9839 °C	7766,03 nm (Longitud de onda media I.R.)
Lámpara incandescente <sup>B</sup>	2500 K	≈2200 °C	1160 nm (Infrarrojo cercano) <sup>C</sup>
La superficie visible del Sol <sup>D4</sup>	5778 K	5505 °C	501,5 nm (Luz verde)
Rayo canal <sup>E</sup>	28 000 K	28 000 °C	100 nm (Luz ultravioleta lejana)
Núcleo del Sol <sup>E</sup>	16 MK	16 millones °C	0,18 nm (Rayos X)
Una arma termonuclear (pico de temperatura) <sup>E5</sup>	350 MK	350 millones °C	8,3 × 10 <sup>-3</sup> nm (Rayos gamma)
En Sandía National Labs la Maquina Z <sup>E6</sup>	2 GK	2000 millones °C	1,4 × 10 <sup>-3</sup> nm (Rayos Gamma) <sup>F</sup>
Núcleo de una estrella masiva en su último periodo de vida <sup>E7</sup>	3 GK	3000 millones °C	1 × 10 <sup>-3</sup> nm (Rayos Gamma)
Combinación de un sistema binario de estrellas de neutrones <sup>E8</sup>	350 GK	350.000 millones °C	8 × 10 <sup>-6</sup> nm (Rayos Gamma)
Colisionador de Iones Pesados Relativísticos (RHIC) <sup>E9</sup>	1 TK	1 billón °C	3 × 10 <sup>-6</sup> nm (Rayos Gamma)
Universo a los 5,391 × 10 <sup>-44</sup> s tras el Big Bang <sup>E</sup>	1,417 × 10 <sup>32</sup> K	1,417 × 10 <sup>32</sup> °C	1,616 × 10 <sup>-26</sup> nm (Frecuencia de Planck) <sup>10</sup>

- Gradiente Geotérmico

$$G = \Delta T / dz$$

$$G = T_s - T_f / z$$

El gradiente geotérmico obedece casi exclusivamente al flujo térmico del **calor interno del planeta**

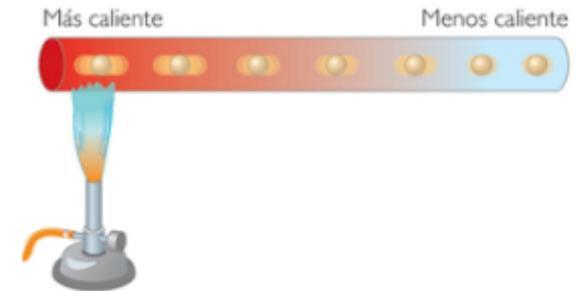
- Flujo Calórico o Térmico (Ley de Fourier)

$$Q = k \Delta T / \Delta z$$

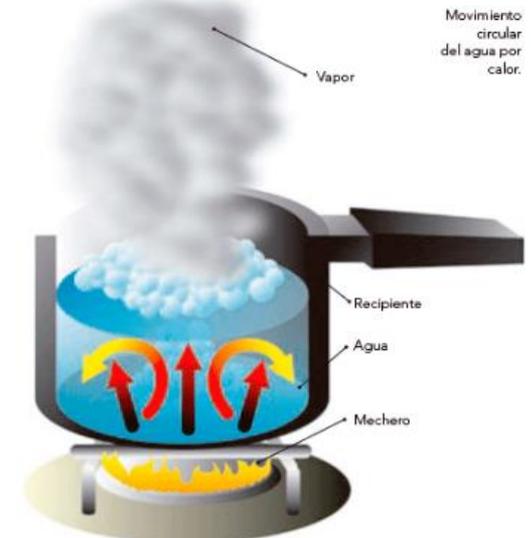
Conductividad térmica: capacidad de conducir calor  
Material isotropos

# Propagación del flujo térmico del calor interno

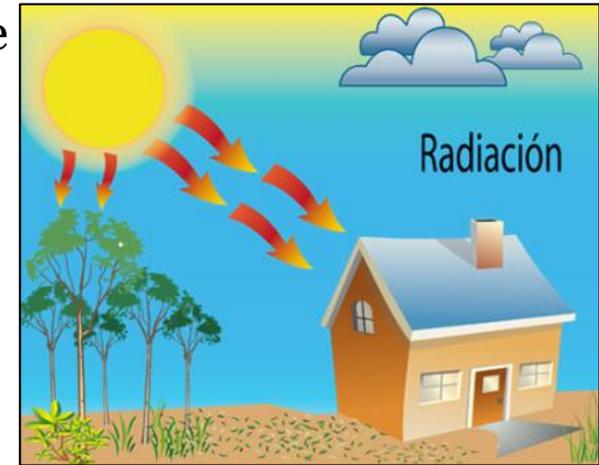
**Conducción:** La conducción es el transporte de calor a través de una sustancia y tiene lugar cuando se ponen en contacto dos objetos a diferentes temperaturas. **No existe transporte de materia en este proceso.**



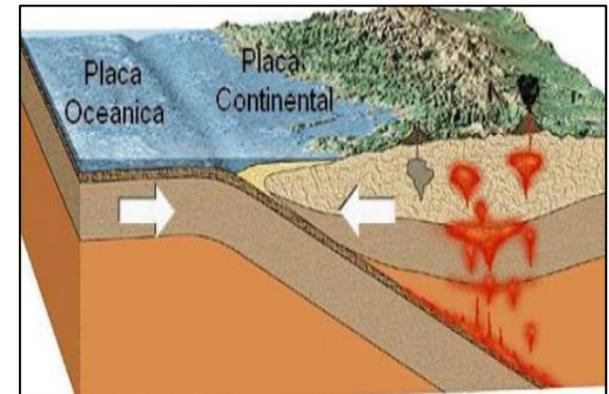
**Convección:** La convección tiene lugar cuando áreas de fluido caliente (de menor densidad) ascienden hacia las regiones de fluido frío. Cuando ocurre esto, el fluido frío (de mayor densidad) desciende y ocupa el lugar del fluido caliente que ascendió. Este ciclo da lugar a una continua circulación (corrientes convectivas) del calor hacia las regiones frías. **Si hay transporte de materia en este proceso.**



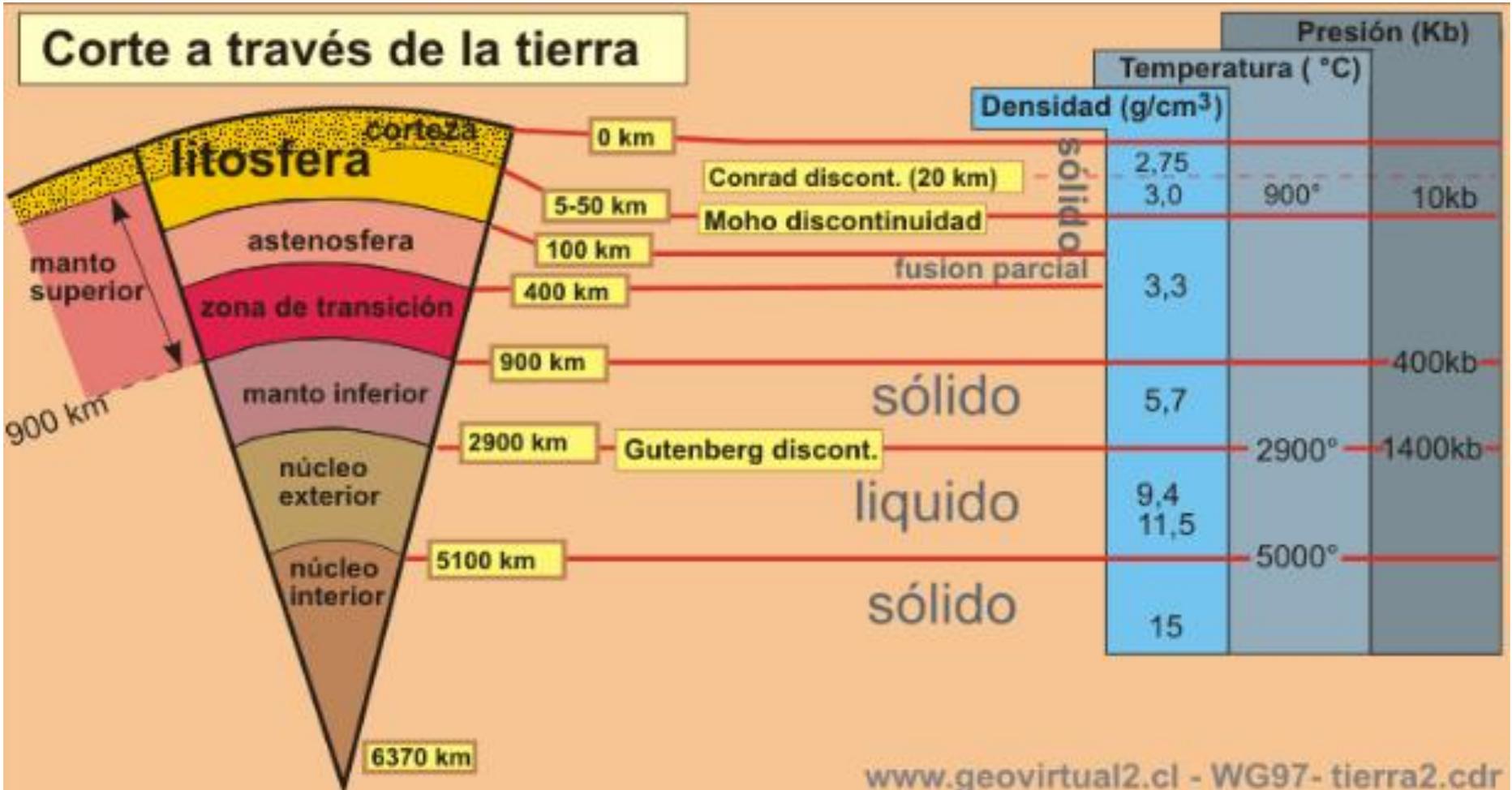
Radiación: es un proceso de transferencia de calor que no precisa de contacto entre la fuente de calor y el receptor. **No se produce ningún intercambio de masa y no se necesita ningún medio material para que se transmita.** La energía se transmite básicamente debido a las radiaciones electromagnéticas.



Advección: es un modo especial de convección, cuando una región es levantada por eventos tectónicos y acerca a la superficie rocas cuyas temperaturas corresponden a zonas más profundas, las cuales toman un largo tiempo en equilibrar sus valores térmicos).

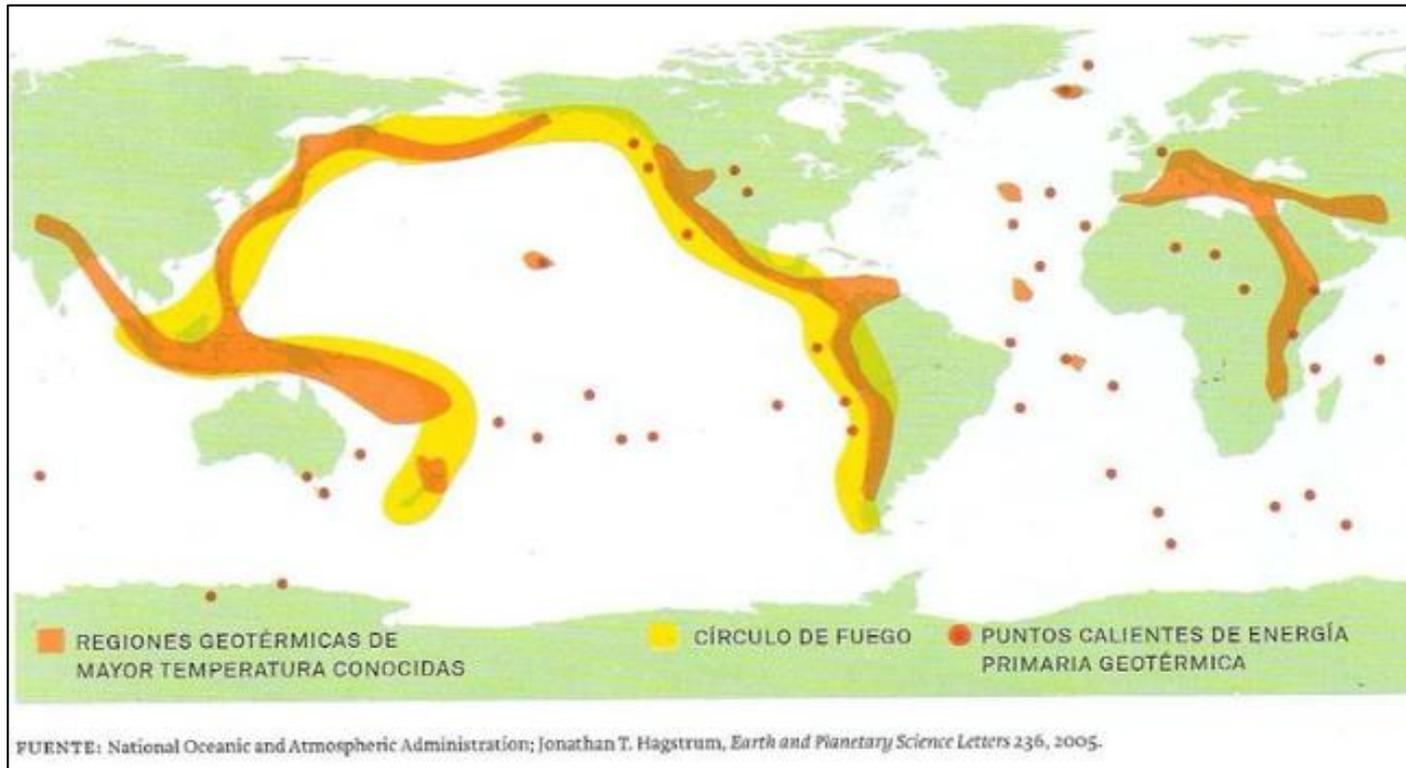


Como el mismo nombre lo indica, Geotermia proviene de Geo: Tierra y termia: temperatura. Es decir que la geotermia es el calor existente en el interior de la Tierra.



# Anomalías Geotérmicas

En lugares privilegiados de la Tierra, pero solo en sentido geotérmico ya que se trata de zonas de vulcanismo y terremotos como el así llamado Cinturón de Fuego del Pacífico, el gradiente geotérmico es más alto que el normal debido a que una cámara magmática, roca en estado plástico a temperaturas del orden de los 1.000 °C, ascendió y se estacionó cerca de la superficie terrestre, saliendo incluso esporádicamente al exterior como erupción volcánica.



# Clasificación de los Campos Geotérmicos

Los campos geotérmicos, según las características del reservorio, se clasifican en:

- 1) **Campos Semitermales** → Cuando producen agua caliente a temperaturas de hasta 100°C.
- 2) **Campos Hipertermales** → Subdivididos a su vez en:
  - a) **Campos Húmedos o de Agua Dominante**: Cuando producen agua presurizada a temperaturas que exceden los 100°C y que al ascender a la superficie generan vapor.
  - b) **Campos Secos o de Vapor Dominante**: Cuando producen vapor seco saturado o sobrecalentado.

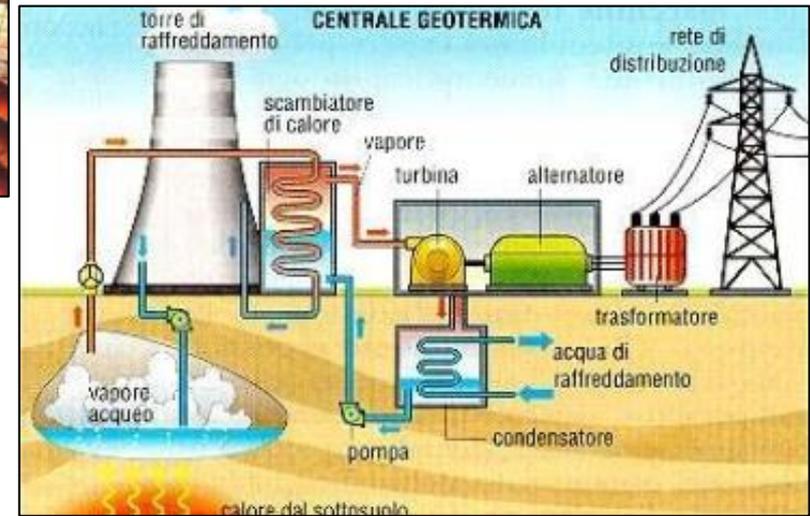
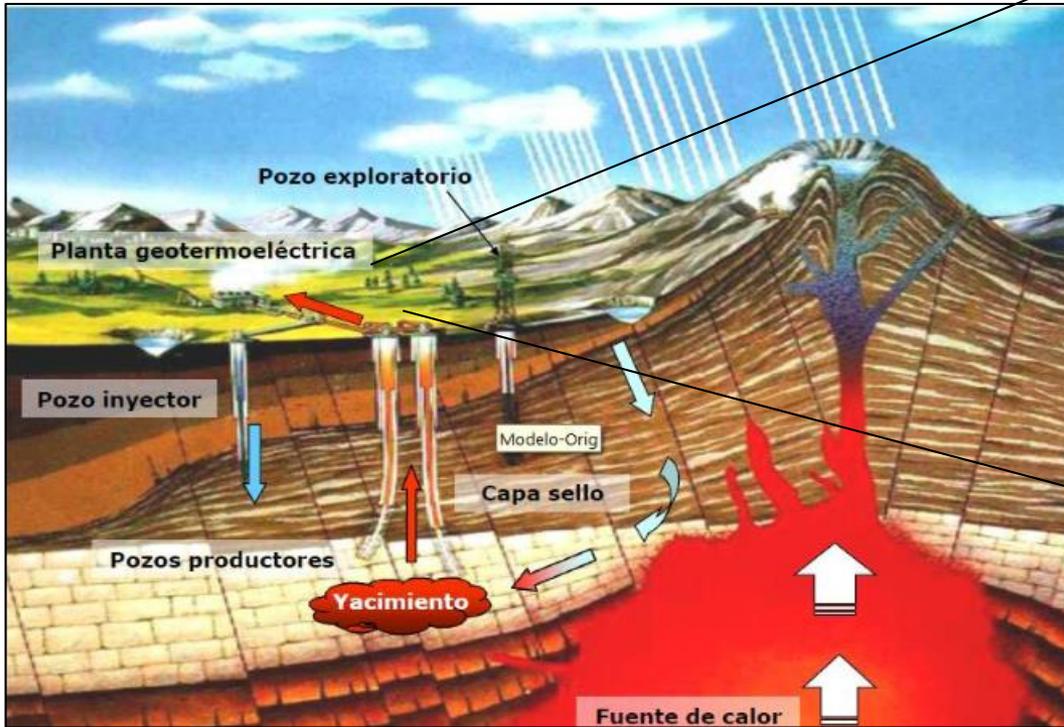
Existe otra clasificación de los campos geotérmicos, y es la que está en función de los usos, es decir aquellos que sirven para genera energía eléctrica y aquellos que sirven solo para uso directos. Esta clasificación está también en función de la temperatura del reservorio, siendo los de más de 180° llamados de **Alta Entalpía**, y los de menos de ese límite llamados de **Baja Entalpía**. A veces se define una categoría intermedia llamada de **Media Entalpía**.

# Clasificación de los Campos Geotérmicos

**Yacimientos cerrados o de baja entalpía** se hallan en regiones donde la corteza posee un comportamiento relativamente estable, (plataformas continentales) En ellas existen áreas semitérmicas que presentan concentración de calor con flujos que tienen gradientes del orden de los 30 a los 50° C por kilómetro de profundidad. Si en estas regiones hay estructuras favorables y se las perfora adecuadamente, se pueden obtener fluidos de moderada temperatura (50 a 180° C).

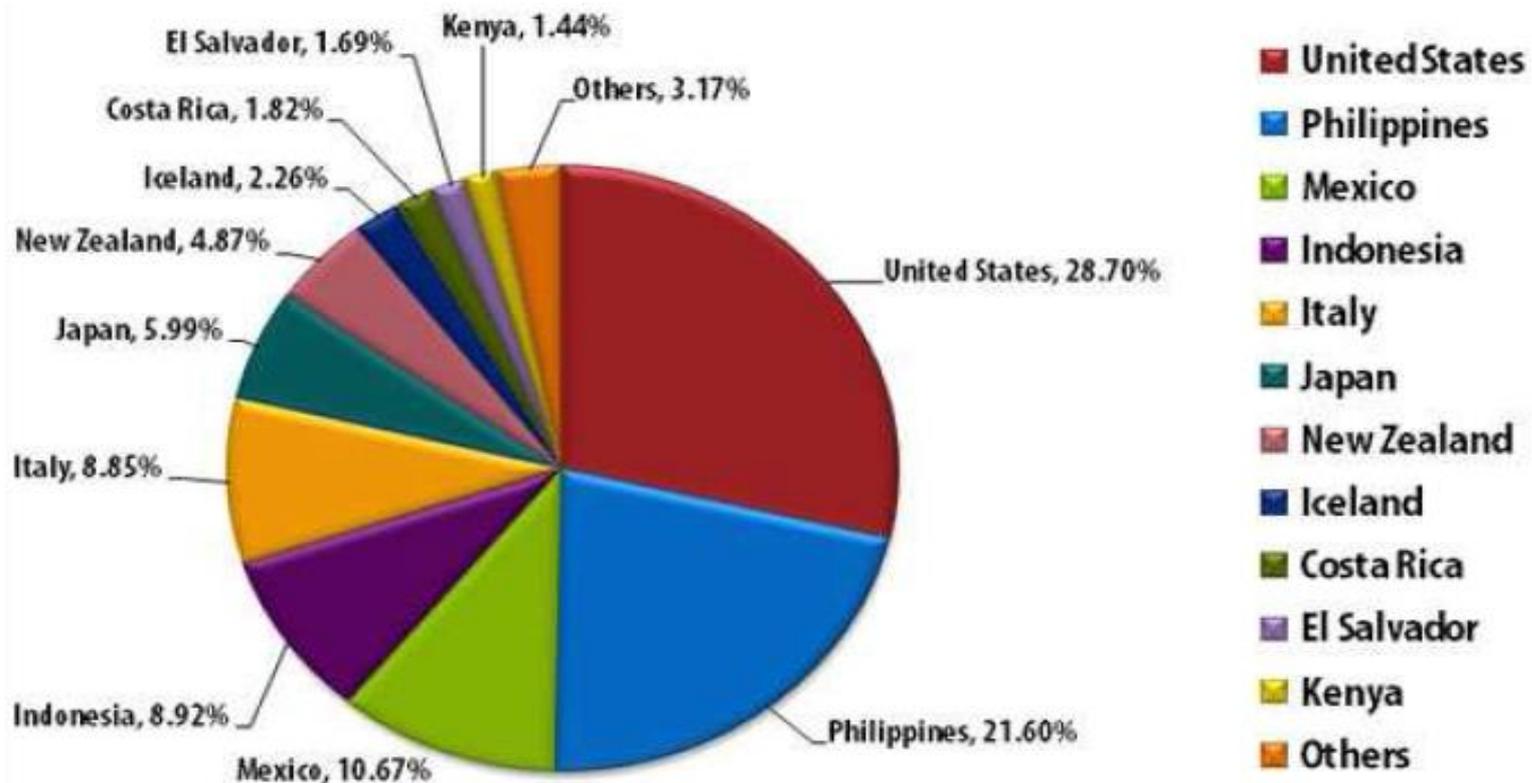
**Yacimientos abiertos o de alta entalpía** están en zonas activas, ubicadas en los límites de placas (divergentes, convergentes o transcurrentes). El emplazamiento de cámaras magmáticas a niveles poco profundos de la corteza permite la concentración de flujo de calor, incrementándose el gradiente geotérmico hasta valores muy altos, con temperaturas de 180 a 300° C a profundidades de 500 a 2000 m. Aunque sólo se limitan a ciertos sectores de la corteza, su interés económico es mayor, dada la alta transferencia de calor y su accesibilidad

# Campo Geotérmico



De acuerdo con la recopilación de datos de la Asociación de Energía Geotérmica (GEA), hay más de 200 GW de potencial hidrotérmico convencional disponible a nivel mundial en base al conocimiento y la tecnología actuales.

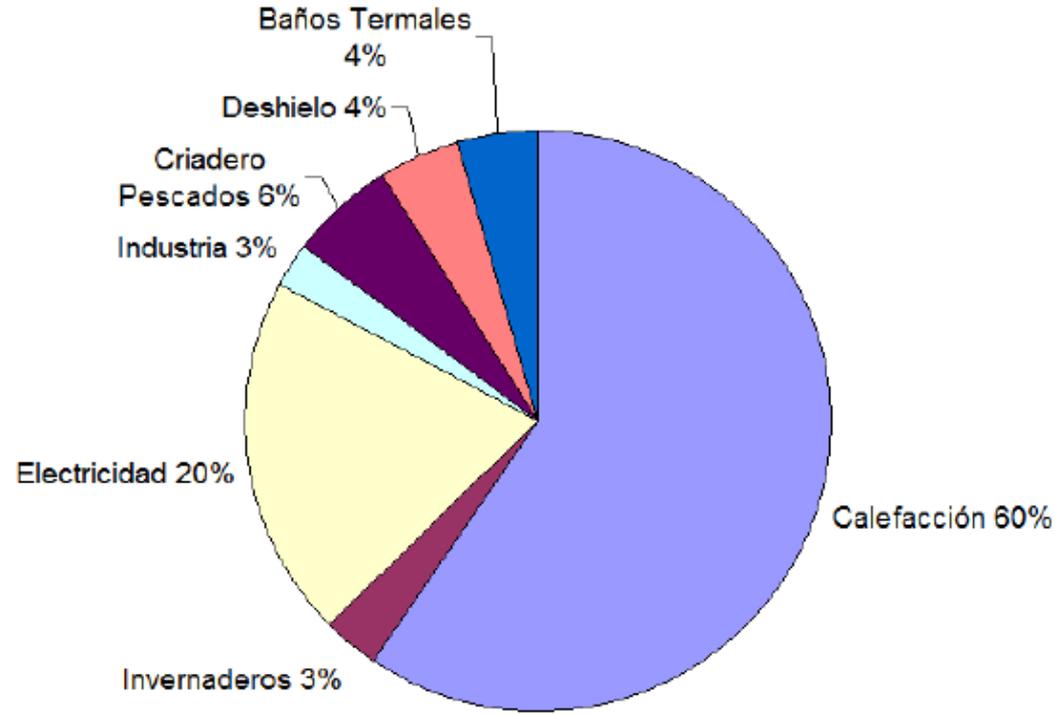
## GEOHERMAL POWER OPERATING CAPACITY BY COUNTRY



*Potencia eléctrica geotérmica instalada en el mundo*

# Usos de la Geotermia

Hasta no hace muchos años había una fuerte tendencia a pensar que la generación de energía eléctrica **era** la más importante aplicación de la geotermia.



# Usos de la Geotermia

La generación de electricidad desde la geotermia no es muy eficiente por las ineludibles restricciones de la termodinámica. En el proceso de conversión de la energía, de calórica a mecánica, y luego a eléctrica, se pierde eficiencia. Otro factor que influyó en este cambio de mentalidad fue el hecho de que los campos de alta entalpía son mucho menos abundantes que los de baja entalpía, siendo su relación de 5 a 1.

Aún tratándose de campos de alta entalpía, no siempre suele ser la mejor elección generar electricidad. Hay muchos factores en juego, pero quizás los más importantes sean la topografía y la ubicación del campo respecto del mercado consumidor del producto. Por ejemplo, el campo de la Toscana en Italia estaba tan lejos de cualquier mercado de energía directa, que el uso más racional fue generar electricidad y transportarla por grandes distancias. En cambio en Islandia, con la presencia de un campo muy cerca de una ciudad muy fría y con largos inviernos, la calefacción y los usos domésticos fueron la mejor elección.

# Ejemplo de Prospección en Argentina

## **Campo Geotérmico Taco Ralo – Río Hondo**

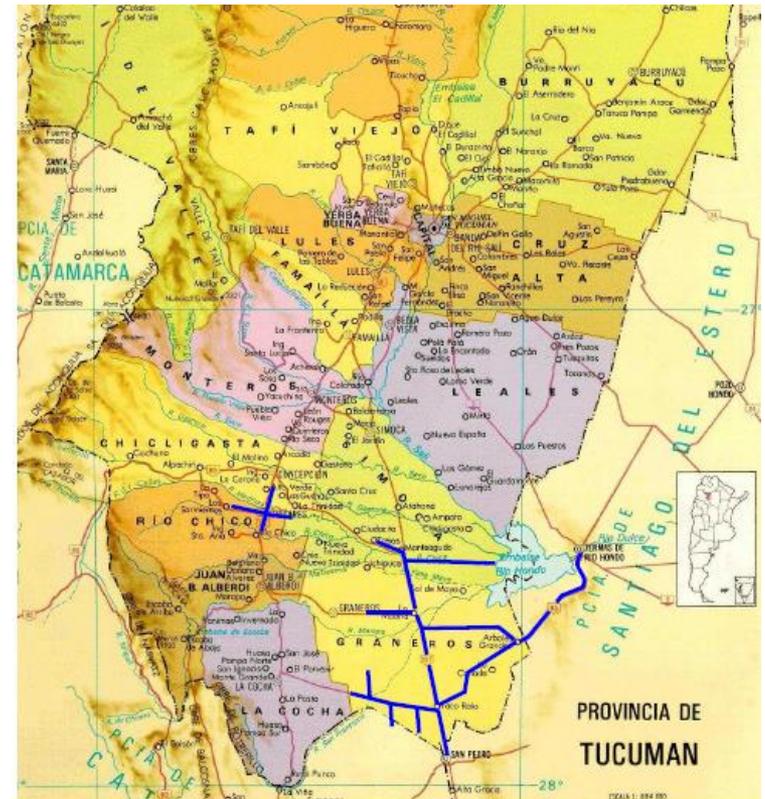
Los primeros estudios se realizaron en el área de Río Hondo (Jurió y col., 1975; Méndez y Miró, 1977) y en ellos se infiere la existencia de un campo de baja energía, sobre la base de estudios hidrogeológicos, geotermométricos e hidrogeoquímicos. Este descubrimiento pasó desapercibido por la comunidad científica, política y económica de Tucumán y Santiago del Estero.

En el año 1982, un grupo de geofísicos (Baldis, Fournier y col.), que estudiaba con métodos magnetoteléuricos el curioso triángulo de silencio sísmico bajo Tucumán, interpreta una gran anomalía eléctrica del subsuelo con una losa altamente conductiva a solo 7 kilómetros de profundidad. Esa losa, con la forma de un domo y su cima bajo Taco Ralo sería roca parcialmente fundida a temperaturas del orden de los 1000°. Esta interpretación resultó bastante coherente para justificar el silencio sísmico en estudio y aseverar la existencia de un campo geotérmico en la llanura tucumana.

## Campo Geotérmico Taco Ralo – Río Hondo

El citado domo sería la cámara magmática, fuente de calor imprescindible de todo cuerpo geotérmico.

La llanura oriental de Tucumán, con su cuenca sedimentaria de unos 2.500 metros de profundidad, sería el recipiente donde se almacena el agua. Y por último, el agua existiría en abundancia debido a que las sierras del Aconquija son una fuente de recursos hídricos inagotables por su alto régimen de lluvias.



Con motivo del citado convenio fui invitado por el CREGEN en Febrero de 1988, a fin de participar en la elaboración del plan de trabajos geofísicos consistentes en estudios gravimétricos y geotérmicos (SEV)

# Medida del Gradiente Geotérmico

## Pozos Petroleros:

- Ensayos de Pozo

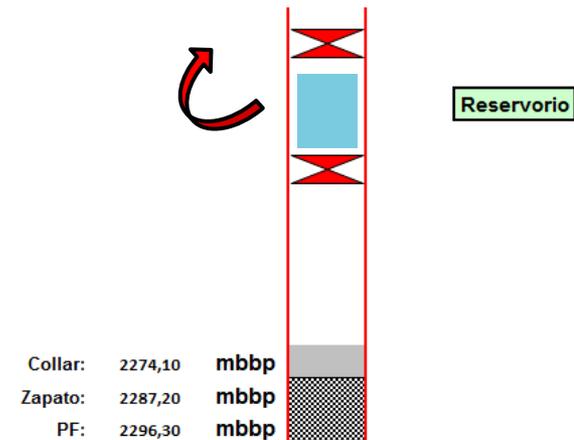
Se trata de extraer el fluido del reservorio en las mismas condiciones, donde luego se le hacen distintos ensayos, entre ellos la medición de la temperatura.

- Perfilaje a pozo abierto

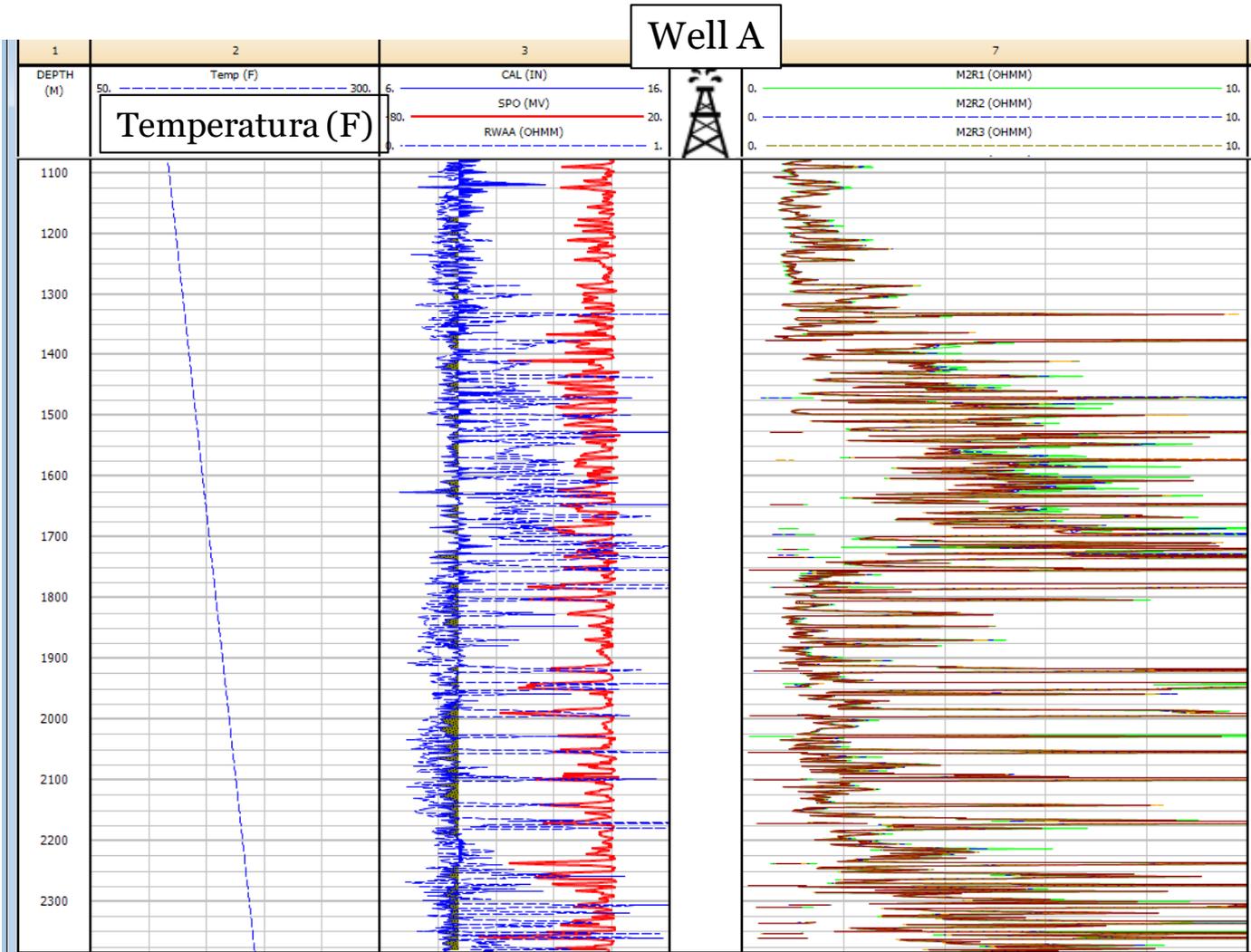


Perfil de temperatura

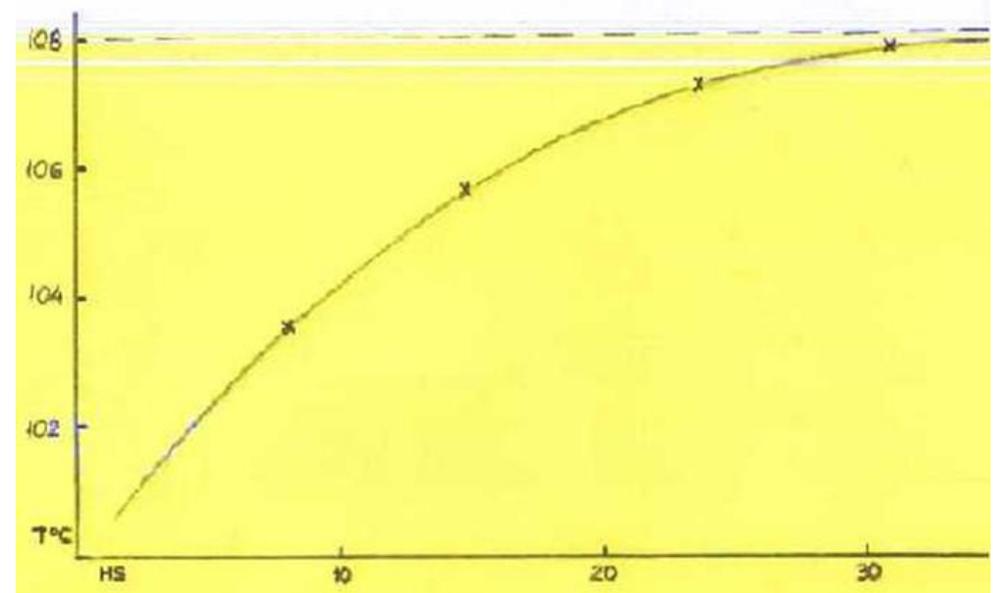
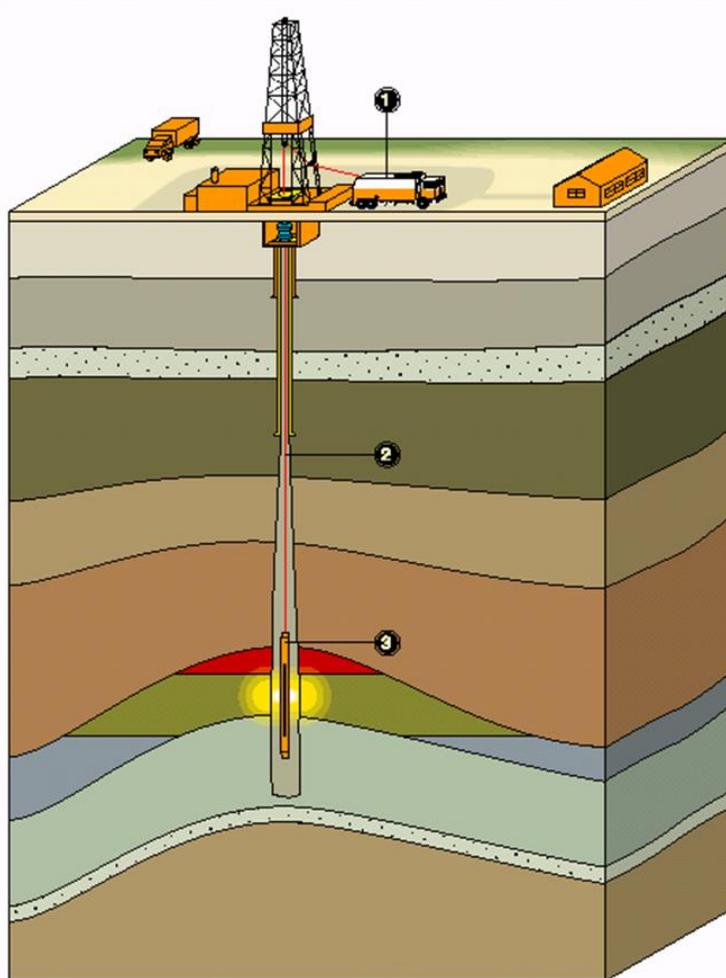
Temperatura de tiempo infinito



# Perfil de temperatura



# Gradiente geotérmico: pozos petroleros



TRAMO	CARRERA	PROF (mbbp)	T°C FDO	Hs FIN CIRC	T°C SUP.	$\Delta T^{\circ}\text{C}$
SUP	1	1602	58.3	2.0	7.1	
SUP	2	1602	61.6	8.5	7.1	
SUP	3	1602	64.9	21.5	7.1	
SUP	4	1602	66.6	35.5	7.1	
<b>INF</b>	1	2645	102.3	2.5	5.6	
INF	2	2645	105.1	8.0	5.6	
INF	3	2645	109.3	23.0	5.6	
INF	4	2645	111.0	37.0	5.6	

# Aplicaciones de Prospección Geotérmica

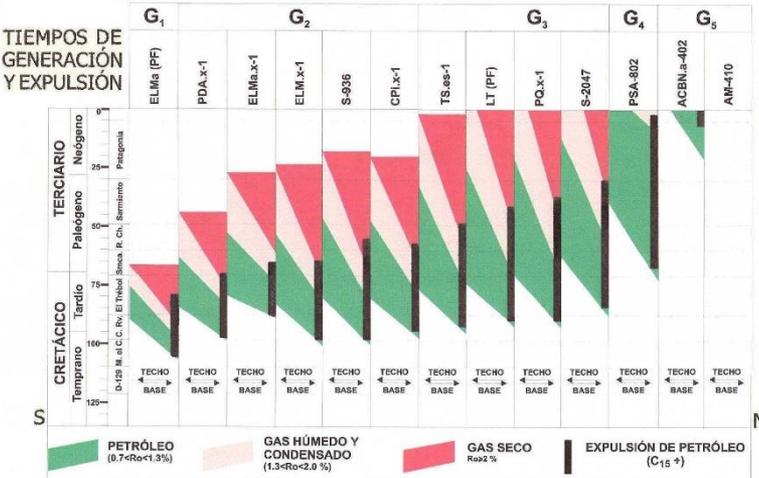
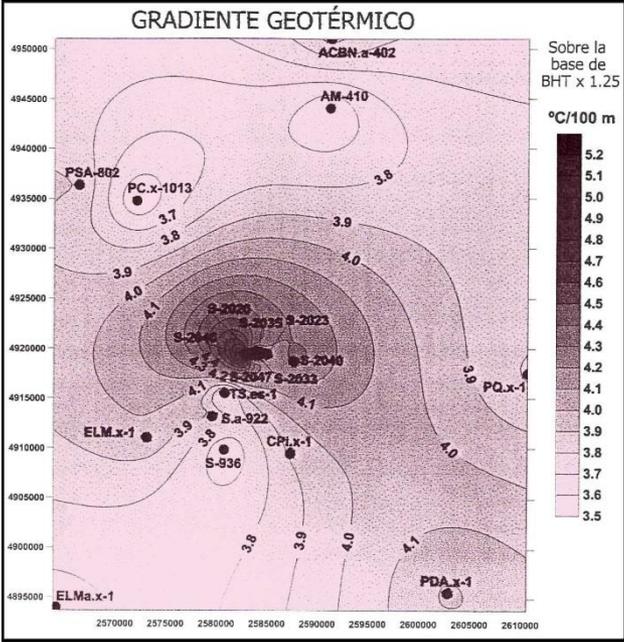
## Medición y mapeo de gradientes geotérmicos relativos:

Estudios de migración de hidrocarburos

Vinculación entre reservorios

Modelados geoquímicos

Calefacción o generación de Energía



MODELADO TÉRMICO Y CINÉTICO DEL ÁREA EL TORDILLO Y REGIONES VECINAS  
TECPETROL - CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE

# Bibliography

- Fowler, C.M.R., 1990. The Solid Earth (p. 219-274). Cambridge University Press.
- Vericat Raga, Juan, 1962. Introducción a la Geofísica (p. 61-79). Ediciones Omega.
- Lowrie, William, 1997. Fundamentals of Geophysics (p. 178-202). Cambridge University Press.
- Poirier, Jean-Paul, 2000. Introduction to the Physics of the Earth Interior (p. 230-243). Cambridge University Press.
- Smith, Peter, 1975. Temas de Geofísica (p.112-182). Editorial Reverté.
- Geotermia: Su grado de desarrollo como generadora de energía eléctrica y sus usos directos. El Campo geotérmico Taco Ralo – Río Hondo. L. Estrada. 2013