

ANEXO 4.
**Metodología de evaluación de los recursos
geotérmicos**



INDICE

	Pág.
1. DEFINICIONES DE LOS CONCEPTOS DE RECURSO Y RESERVA EN ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 CLASIFICACIONES, CONCEPTOS Y DEFINICIONES	2
2. CUANTIFICACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS.....	8
2.1 CONSIDERACIONES PREVIAS.....	8
2.2 UNIDADES DE MEDIDA	8
2.3 ESTIMACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS: EL MÉTODO VOLUMÉTRICO	9
2.4 FACTOR DE RECUPERACIÓN.....	12

1. DEFINICIONES DE LOS CONCEPTOS DE RECURSO Y RESERVA EN ENERGÍA GEOTÉRMICA

1.1 Introducción

Toda explotación de recursos naturales necesita de una terminología de cuantificación que permita definir, además de las cantidades que pueden producirse en las condiciones puntuales del momento, las que queden por extraer a corto y medio plazo, o incluso a largo plazo con distintos condicionantes tecnológicos y económicos.

En el caso de la minería y la hidrogeología, los conceptos de recursos y reservas están perfectamente definidos, aunque en algunas ocasiones se apliquen de una manera un tanto amplia y permisiva. La energía geotérmica, con evidentes implicaciones en los dominios minero e hidrogeológico, comenzó a tener sus cuantificaciones con el trabajo de WHITE y WILLIAMS (1975), del *U.S. Geological Survey*, mediante el que se evaluaron los recursos geotérmicos de EEUU. Posteriormente, MUFFLER y CATALDI (1978) publicaron una exhaustiva revisión de los métodos de definición de recursos y reservas, cuyos principios y criterios básicos sirvieron a ROWLEY (1982) para efectuar la primera valoración a nivel mundial de las posibilidades de este recurso energético. Conceptos similares han sido barajados más recientemente por HAENEL (1985) para homogeneizar los criterios de cuantificación al coordinar la evaluación de recursos y reservas geotérmicas en los países de la UE.

La mayor parte de conceptos utilizados para describir las cantidades aprovechables de una determinada sustancia tiene su origen en la industria minera, donde se plantea la necesidad no solo de saber cuánto mineral podría extraerse de un yacimiento conocido, sino también de evaluar la extensión y los límites del mismo para llevar a cabo las necesarias previsiones económicas de explotación.

En minería ha sido siempre muy frecuente el empleo de nombres más o menos descriptivos (depósito, reserva, recurso, etc.) acompañados de un adjetivo (probado, probable, posible, identificado, supuesto, submarginal, subeconómico, etc.), que han sido utilizados de manera distinta por los diferentes autores. La combinación de estos adjetivos con los referidos nombres ha dado origen a numerosas clasificaciones que varían en función del país, el autor, la sustancia mineral, etc.

SCHANZ, en 1975, resumió los esfuerzos de grupos industriales y equipos gubernamentales para homogeneizar la terminología al respecto, en un trabajo¹ que supuso un examen exhaustivo de los términos aplicados a los recursos en general y a la energía en particular. A partir de este trabajo se adoptó el criterio general, tanto por parte europea como americana, de clasificar las reservas minerales y de combustibles fósiles en función de los parámetros propuestos por McKELVEY² en 1972: el **grado de factibilidad económica** de la explotación y su **grado de riesgo geológico**. Se reconoció, asimismo, la necesidad de especificar dos nuevos conceptos, **reserva** y **recurso**, en cuya definición se tiene en cuenta la viabilidad

¹ Schanz, J.J., Jr. (1975). Resource terminology: an examination of concepts and terms and recommendations for improvement. *Palo Alto, Calif., Electric Power Research Institute. Research Project 336, August, 1975, 116 pp.*

² McKelvey, V.E. (1972). Mineral resource estimates and public policy. *American Scientist* 60: 132-40.

comercial, que, a su vez, depende de factores técnicos y económicos. El primero de los conceptos indicados está ligado a la rentabilidad en el momento de la clasificación, mientras que el segundo lo está a la rentabilidad que eventualmente podría generarse con igual criterio en un tiempo futuro, con diferentes precios de mercado y nuevas tecnologías. El concepto de reserva, por tanto, es el normalmente utilizado en decisiones a corto plazo, mientras que el de recurso tiene implicaciones más estratégicas, políticas y de inversiones a largo plazo. En este sentido, las directrices de la *Society of Petroleum Engineers* (SPE) recomiendan el uso del término reserva solo para hacer referencia a un proyecto específico, y, preferiblemente, cuyo desarrollo esté previsto en un plazo de unos cinco años³.

1.2 Clasificaciones, conceptos y definiciones

Las diversas clasificaciones que se han llevado a cabo para evaluar la energía geotérmica han utilizado premisas de partida distintas en cada caso e, incluso, diferente terminología. Este hecho ha conducido a una situación de confusión basada en varios aspectos entre los que cabe destacar:

- Las diferentes profundidades útiles de extracción que se asumen en los diversos modelos.
- La diversidad de coeficientes de recuperación supuestos.
- La importancia dada al concepto de renovabilidad.
- Los posibles usos de la energía geotérmica.
- La relación entre la energía existente en el yacimiento, la extraída y la utilizada.
- Las unidades de medida, sobre todo en lo que respecta a las conversiones de energía térmica en capacidad eléctrica.

Existen definiciones en las que, normalmente, han estado de acuerdo todas las partes implicadas en la industria geotérmica:

- **Recurso geotérmico.-** Energía térmica o calor contenido en la roca y en el fluido en ella almacenado que puede ser extraída por el hombre.
- **Evaluación de recursos geotérmicos.-** Estimación de la cantidad de recurso existente en una determinada área de la corteza terrestre y de la fracción que de esa cantidad puede ser extraída o recuperada en un tiempo y unas condiciones legales, económicas y tecnológicas determinados.

A partir de estas definiciones, consensuadas y aceptadas por todos los actores, han surgido, por parte de diversos autores, distintos conceptos en los que se barajan los criterios antes expuestos:

³ Australian Geothermal Energy Group – Geothermal Code Committee. Geothermal Lexicon For Resources and Reserves Definition and Reporting. *Edition 1, August 2008.*

- **Recurso geotérmico de base.-** Calor contenido en la corteza terrestre desde la superficie hasta una profundidad de 7-10 km (según autores), sin limitaciones de ningún tipo. Es el concepto más general.
- **Recurso geotérmico de base accesible.-** Al concepto anterior se le establece la limitación de que la profundidad límite sea la alcanzada hoy en día por las máquinas de perforación habituales. Según diferentes autores, esta profundidad es de 3 a 7 km: la primera, como límite normal de sondeos geotérmicos productivos; la segunda, como profundidad límite normal de perforación profunda sin excesivos problemas tecnológicos.

Tras estas definiciones de base, ya con problemas de cuantificación iniciales, se han llevado a cabo ciertas clasificaciones.

La clasificación seguida por los franceses (LAVIGNE, 1978)⁴ es, quizás, de las más prácticas publicadas. Según se refleja en la figura 1, dentro de los recursos de base accesibles, pueden distinguirse:

- **Recursos identificados por prospección.-** Comprenden las reservas y los recursos condicionados.
- **Recursos no identificados.-** Divididos en hipotéticos y especulativos.

Las definiciones correspondientes a cada una de las subdivisiones establecidas son las siguientes:

- **Recursos hipotéticos.-** Recursos situados en regiones poco conocidas, contenidos en yacimientos perfectamente explotables con métodos clásicos, pero para los que es necesario precisar su localización y características. También pueden comprender recursos no explotables con métodos clásicos, pero situados a una profundidad económica y a una temperatura suficientemente elevada como para que se pueda emprender su prospección y explotación en un futuro no lejano. Es el caso de los yacimientos de roca caliente seca, cuya técnica de explotación está actualmente en plena investigación.
- **Recursos especulativos.-** Recursos situados en rocas compactas a profundidades menores de 10 km y en regiones que no presentan anomalías térmicas. Sería una generalización de los de roca caliente seca.
- **Recursos condicionados.-** Recursos conocidos y evaluables, contenidos en un yacimiento geotérmico, pero no explotables en la actualidad por razones técnicas o económicas. Por ejemplo, recursos de baja entalpía, lejos de centros de consumo.
- **Reservas totales.-** Recursos identificados, contenidos en un yacimiento geotérmico, explotables técnica y económicamente en la actualidad. Son, por tanto, recursos cuya temperatura es mayor que la considerada no económica y que están situados próximos a los centros de consumo en el caso de ser de baja entalpía.

⁴ Lavigne, J. Les ressources géothermiques françaises – possibilités de mise en valeur. *Ann. des Mines. April (1978).*

- **Reservas recuperables.-** La parte de las reservas totales que se puede utilizar realmente. Su importancia depende estrechamente de la tecnología de explotación y puede, en condiciones óptimas, alcanzar el 60% de las reservas totales.

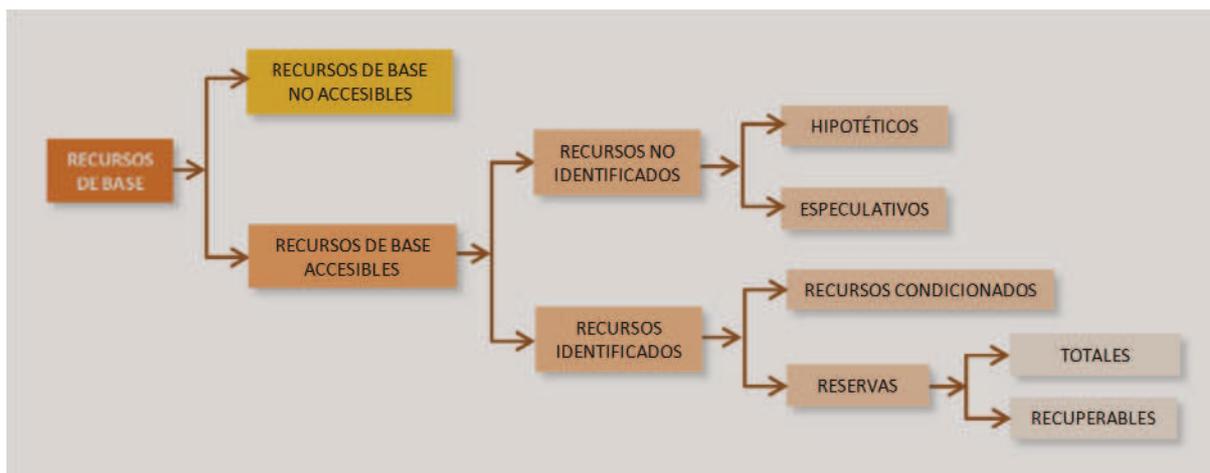


Figura 1. Clasificación Francesa de Recursos y Reservas Geotérmicas
(Lavigne, 1978)

Otra clasificación con la misma finalidad, que difiere en algunos conceptos pero resulta igualmente útil, es la propuesta por MUFFLER y CATALDI (1978), reflejada en la figura 2. En este caso, la separación entre recursos de base accesibles y no accesibles responde a los mismos criterios de profundidad ya expuestos. La división entre **recurso residual** y **recurso útil** se establece según un criterio de factibilidad económica en un futuro a largo plazo (30-50 años), en función de la tecnología existente y de la economía del producto. Se trata de un concepto riguroso pero muy difícil de cuantificar.

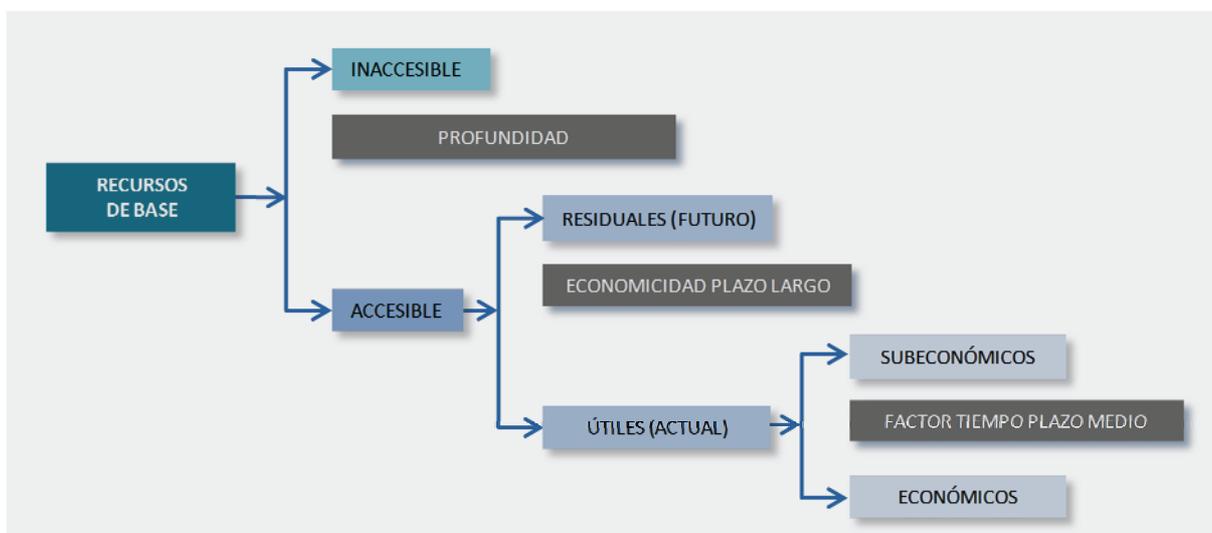


Figura 2. Clasificación de Recursos y Reservas Geotérmicas
(Muffler y Cataldi, 1978)

El **recurso de base accesible útil** representa la energía térmica que puede ser extraída a costes competitivos con otras formas de energía en la actual situación de desarrollo tecnológico y de mercado. Su subdivisión en **recursos subeconómicos y económicos** hace referencia al momento puntual en el que se considere cada caso, con un criterio de viabilidad económica a corto-medio plazo (10-20 años). En la categoría de subeconómica, se incluye la energía geotérmica que no puede ser extraída legalmente a costes competitivos en el momento concreto de la evaluación, pero que puede resultar competitiva ante pequeños cambios legales, tecnológicos o de situación del mercado (por ejemplo, precios de los combustibles fósiles).

Aunque existen líneas de investigación muy recientes que podrían, en el futuro, alterar algunas definiciones, en la actualidad, la clasificación más aceptada, tanto por parte de los países de la UE como del U.S. *Geological Survey* (EEUU), Australia y Japón, es la que establece el **diagrama de McKelvey** (McKELVEY, 1972; U.S.G.S., 1976)⁵ adaptado a geotermia, que incluye la mayor parte de los conceptos hasta ahora expuestos.

En un diagrama rectangular (figura 3) se compara el grado de factibilidad económica (vertical, más o menos equivalente a profundidad) con el riesgo geológico (horizontal). El criterio técnico-económico permite diferenciar los recursos de base en **accesibles e inaccesibles**, en función de la profundidad y la competitividad. El riesgo geológico o seguridad geológica se valora en dos grandes categorías: el recurso **no descubierto** y el **identificado**, este último entendido como el que se ha caracterizado por alguno de los siguientes medios: a) únicamente geológicos (**posible**), b) geológicos, geofísicos y/o geoquímicos (**probable**) ó c) ha sido evidenciado mediante perforación (**probado**).

Definitivamente, la diferenciación entre recursos y reservas queda determinada como sigue:

- **RECURSO** = Recurso base accesible útil, tanto identificado como no descubierto. Es la energía que podrá ser extraída económica y legalmente en un futuro próximo, incluyendo las reservas.
- **RESERVA** = Recurso identificado económico. La parte de los recursos que pueden ser extraídos económica y legalmente en la actualidad.

En base a estas definiciones previas, se establece la siguiente **clasificación de los recursos geotérmicos**, generalmente aceptada por los diferentes grupos de investigadores e industriales:

- **Recurso base.-** Todo el calor almacenado en la corteza terrestre, bajo un área concreta y en un momento determinado, tomando como límite térmico inferior la temperatura media anual de la zona, sin límite de profundidad y, por tanto, sin cuantificación posible.

⁵ McKelvey, V.E. (1972). Mineral Resource estimates and public policy. *American Scientist* 60, 32-40. U.S. Geological Survey (1976). Principles of the mineral resource classification system of the U.S Bureau of Mines and U.S. Geological Survey. *U.S. Survey Bull.* 1540-A, 5 pp.

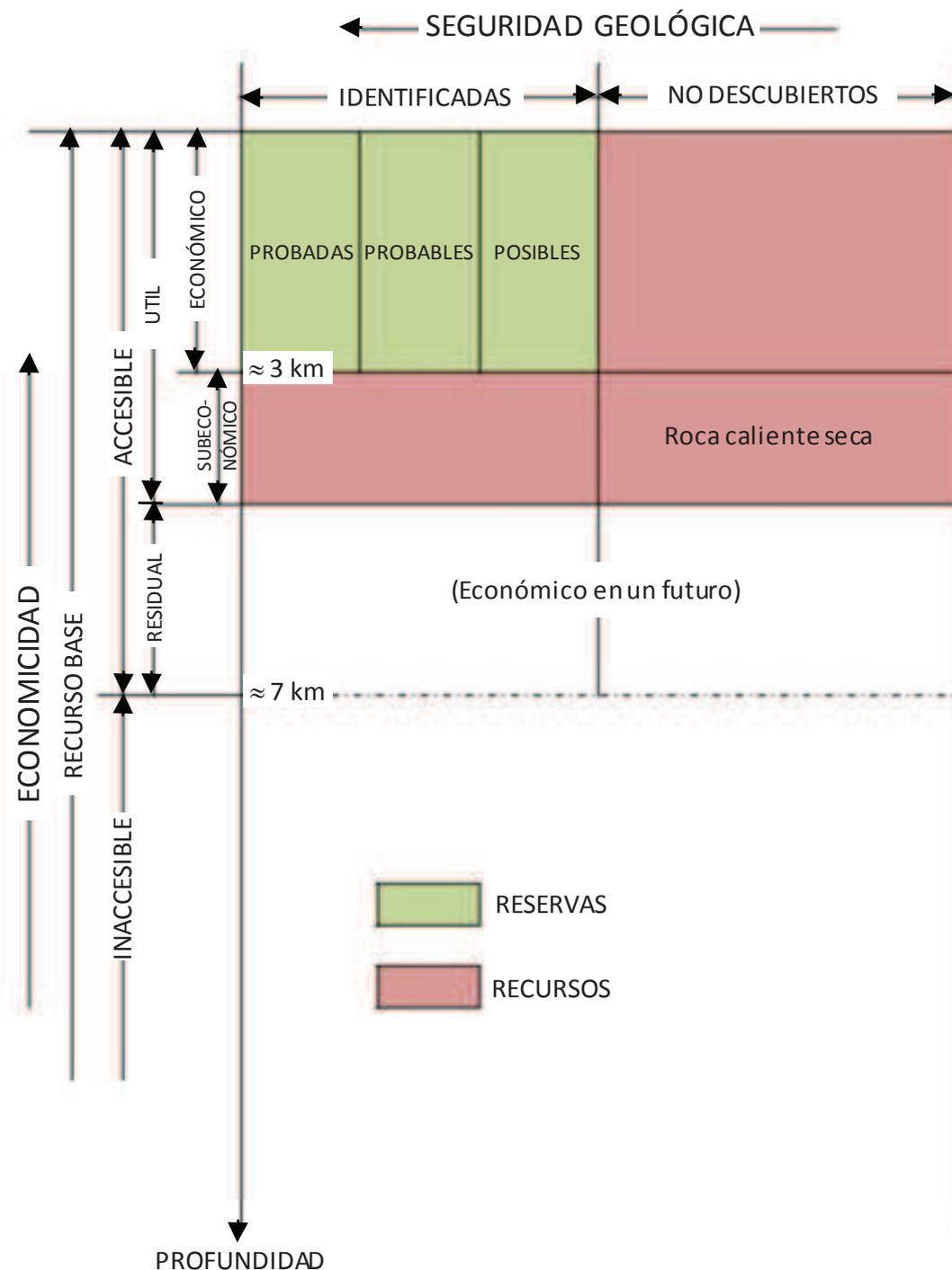


Figura 3. Diagrama de McKelvey

- **Recurso base inaccesible.-** Todo el calor almacenado en la corteza terrestre, entre la discontinuidad de Moho –límite entre corteza y manto– y una determinada profundidad (~7 km como límite de perforación), bajo un área concreta y en un momento determinado, tomando como límite inferior la temperatura media anual de la zona. Tampoco puede ser cuantificado.
- **Recurso base accesible.-** Todo el calor almacenado entre la superficie terrestre y una determinada profundidad (~7 km como límite de perforación), bajo un área concreta y en un momento determinado, tomando como límite inferior la temperatura media anual de la zona.
- **Recurso base accesible residual.-** La parte del recurso base accesible que, probablemente, podrá ser extraído de manera económica y de forma legal en un futuro indeterminado, en base a la evolución de la economía y de las técnicas de perforación.
- **Recurso base accesible útil = RECURSO.-** Energía que podrá ser extraída económica y legalmente en un futuro próximo (100 años), incluyendo las reservas.
- **Recurso subeconómico.-** Parte de los recursos de un área determinada que no pueden extraerse legalmente a un coste competitivo con otras fuentes energéticas convencionales en el presente, pero que podrán serlo en un futuro próximo por mejora de la tecnología y/o variación de los condicionantes económicos. Es el caso de los almacenes de roca caliente seca.
- **Recurso económico.-** Parte de los recursos de un área determinada que pueden extraerse legalmente a un coste competitivo con otras fuentes energéticas convencionales en el momento presente.
- **Recurso económico no descubierto.-** Parte de los recursos económicos de zonas inexploradas en regiones donde se sabe que existen recursos geotérmicos, o de regiones donde se supone su existencia por criterios geológicos pero que aún no han sido descubiertos.
- **Recurso subeconómico no descubierto.-** Parte de los recursos no descubiertos que quizás puedan extraerse con la tecnología de roca caliente seca.
- **Recurso identificado.-** Parte de los recursos accesibles que pueden ser explotados ahora o en un futuro próximo, debido a que existe una cierta investigación previa que los evidencia en mayor o menor grado. Introduce el concepto de **factor de recuperación máximo** y es la cuantificación más realista y a la vez conservadora de todas las definiciones.
- **Recurso identificado económico = RESERVA.-** La parte de los recursos identificados, caracterizados por geología, geoquímica, geofísica o perforación, que pueden ser extraídos económica y legalmente en la actualidad hasta una profundidad de 3 km.
- **Reservas probadas.-** Parte de las reservas que se han evidenciado mediante perforación y medidas directas y que pueden producir energía a costes competitivos en el momento de su determinación.

- **Reservas probables.-** Parte de las reservas que han sido puestas de manifiesto mediante investigación geológica, geoquímica y/o geofísica, aunque sin llegar a perforar, pero que, de alumbrarse, resultarían productivas a costes competitivos o en el momento de su determinación.
- **Reservas posibles.-** Parte de las reservas cuya existencia está basada solamente en criterios geológicos pero que, de extraerse, resultarían económicamente competitivas en el momento de su determinación.

2. CUANTIFICACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS

2.1 Consideraciones previas

A la hora de estimar los recursos o reservas, se deben especificar siempre las condiciones económicas y tecnológicas que van a condicionar la utilización de la energía que se está intentando producir.

La práctica habitual es dividir el recurso o reserva geotérmica total en energía para producción eléctrica y recurso o reserva para otros usos. Estas dos categorías son aditivas, no acumulativas, de manera que:

$$\text{RESERVA TOTAL} = \text{reserva para producción eléctrica} + \text{reserva para otros usos}$$

Dado que la abundancia de sistemas geotérmicos decrece rápidamente con el incremento de temperatura, la reserva o el recurso para producción eléctrica constituirá solo una pequeña fracción de la reserva o el recurso total.

Otra consideración a tener en cuenta es que todas las cuantificaciones de recursos y reservas deben referirse como **calor almacenado producible** o potencialmente producible **en boca de pozo**, antes de cualquier tipo de transporte, conversión o utilización. Los conceptos de recurso y reserva no deben tomar en cuenta las inevitables e importantes pérdidas inherentes a toda aplicación práctica. Este concepto es idéntico al utilizado con los combustibles fósiles, en los que el petróleo o el carbón se cuantifican en barriles o en toneladas, pero nunca en kWh de electricidad que puedan generar.

Este modo de proceder permite la comparación de resultados y la introducción de un parámetro importante: el **factor de utilización**. Solo una pequeña parte de la energía geotérmica producida puede convertirse en electricidad (~10% en función de las condiciones de almacén), desperdiándose el resto, a no ser que se efectúe un aprovechamiento térmico posterior.

2.2 Unidades de medida

Las unidades utilizadas para cuantificar la fenomenología geotérmica han resultado durante mucho tiempo completamente anárquicas por las diferencias entre medidas anglosajonas y métricas. La orden de reconversión al sistema métrico de EEUU en 1975 estableció el empleo normativo del Sistema Internacional (S.I.), pero lo cierto es que el técnico geotérmico, ya no americano, sino incluso europeo, se resiste a utilizar el grado Kelvin como medida de temperatura, el Pascal como medida de presión o el Joule como unidad de energía. Volviendo al mismo ejemplo, todos los técnicos continúan con la costumbre de emplear el grado Celsius para la temperatura, el bar o la atmósfera para la presión y la caloría o el kWh para la energía, según sea térmica o eléctrica. El obligatorio Sistema Internacional poco puede hacer frente a la inercia humana e institucional, y tardará, evidentemente, años en quedar implantado.

La tabla 1 recoge los factores de conversión para las unidades más corrientemente utilizadas en geotermia, tanto térmicas como eléctricas.

	kcal	Julio	kWh	MWh	Btu	tep
1 kcal	1	4.187	$1,16 \times 10^{-3}$	$1,16 \times 10^{-6}$	3,97	1×10^{-7}
1 Julio	$2,39 \times 10^{-4}$	1	$2,78 \times 10^{-7}$	$2,78 \times 10^{-10}$	$9,48 \times 10^{-4}$	$2,39 \times 10^{-11}$
1 kWh	860	$3,6 \times 10^6$	1	1×10^{-3}	3.412	$8,6 \times 10^{-5}$
1 MWh	$8,6 \times 10^5$	$3,6 \times 10^9$	1×10^3	1	$3,41 \times 10^6$	$8,6 \times 10^{-2}$
1 Btu	0,252	1.055	$2,93 \times 10^{-4}$	$2,93 \times 10^{-7}$	1	$2,52 \times 10^{-8}$
1 tep	1×10^7	$4,19 \times 10^{10}$	$1,16 \times 10^4$	11,6	$3,97 \times 10^7$	1

Tabla 1. Factores de conversión para unidades térmicas y eléctricas

2.3 Estimación de Recursos y Reservas: El Método Volumétrico

Mientras la estimación de recursos y reservas de minerales y combustibles fósiles ha sido una disciplina normalmente aplicada a lo largo de este siglo, la valoración del potencial geotérmico constituye un campo de investigación mucho más novedoso, razón por la que las metodologías de evaluación no están estandarizadas. Por otra parte, en cada país y en cada caso concurren una serie de condicionantes específicos que pueden resumirse en los siguientes:

- **Factores geológicos y físicos:** distribución de la temperatura, calor específico de la roca, porosidad eficaz total, permeabilidad, modelo de circulación de los fluidos, tipo de fase fluida, profundidad del almacén, etc.
- **Factores tecnológicos:** tecnología de perforación, tecnología de explotación del yacimiento, factores de conversión de la energía térmica en energía eléctrica, factores de utilización de la planta, utilización de los fluidos de descarga, etc.
- **Factores económicos:** costes de explotación de las plantas de utilización, costes financieros, precios de la energía convencional, valor de la propia energía geotérmica, etc.

- **Factores ligados al marco institucional:** legislación vigente, oportunidad de desarrollar otras fuentes energéticas locales, factores sociales, limitaciones ecológicas, etc.

De entre todos estos factores, algunos no resultan muy difíciles de evaluar objetivamente, como sucede con los tecnológicos y los económicos a corto plazo. Otros, sin embargo, pueden resultar más difícilmente previsibles (evolución de los precios de la energía, política energética del país, etc.). La evaluación del potencial geotérmico se hace progresivamente más difícil a medida que se pasa a escalas de trabajo más localizadas.

Los métodos cuantitativos para evaluar recursos geotérmicos se suelen agrupar en cuatro categorías:

- Método del flujo térmico superficial
- Método volumétrico
- Método de fracturas planas
- Método de aporte de calor magmático

El segundo de ellos es el de aplicación más generalizada. El método volumétrico, también denominado método del "calor volumétrico" o del "calor almacenado" o "heat in place", basa su principio en calcular la energía contenida en un cierto volumen de roca. Este método ha sido el empleado por la Unión Europea en la elaboración de los diferentes Atlas de Recursos Geotérmicos publicados hasta la fecha (1988 y 2002). Asimismo, numerosos autores han utilizado este método en sus trabajos de cuantificación de recursos geotérmicos en Wairakei y Broadlands (Nueva Zelanda), en Kawerau también de Nueva Zelanda, en Ahuachapán en El Salvador, en Pauzhetsk (Kamchatka), en Italia, en los sistemas convectivos de EEUU, en Takinoue en Japón y en muchos otros. El método también se ha adoptado, de manera mucho más esquemática, para numerosos estudios a escala continental.

El primer paso a realizar para aplicar el método es calcular el recurso accesible de base, es decir, la energía térmica existente in situ hasta una determinada profundidad, refiriendo todos los cálculos a la temperatura media anual (T_0) en superficie. En la práctica, se lleva a cabo una aproximación dividiendo la porción de corteza superior bajo un área determinada en una serie de intervalos, que normalmente corresponden a las unidades geológicas, y se estima a continuación la temperatura de cada volumen. Se puede proceder entonces de dos maneras

- estimando un calor específico volumétrico y calculando la energía térmica total contenida en la roca y en el agua, o bien
- estableciendo un valor para la porosidad total de cada volumen y calculando separadamente la energía contenida en la roca y en el fluido.

Los resultados obtenidos mediante estos dos métodos no difieren, por lo general, en más del 5% si la porosidad total es inferior al 20%, que es lo más habitual en los ámbitos geológicos más generalizados, y el fluido que rellena los poros es agua líquida. La segunda modalidad

pone de manifiesto que, en casi todos los almacenes, el 90% de la energía térmica se halla contenida en la roca y solo el 10% en el agua.

Para la estimación de los Recursos de Base Accesible (RBA) se utiliza la fórmula:

$$RBA_i(\text{julios}) = V_i(\text{m}^3) \cdot \rho_i \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot C_i \left(\frac{\text{julios}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \cdot \frac{T_i - T_0}{2} (^\circ\text{C})$$

En la que

RBA_i = Recurso de Base Accesible a la profundidad i

V_i = Volumen del terreno desde la superficie hasta la profundidad i .

ρ_i = Densidad media de la columna rocosa hasta la profundidad i . Para los materiales existentes en nuestro subsuelo se toma como valor medio $\rho_i = 2.650 \text{ kg/m}^3$.

C_i = Capacidad calorífica media de la columna rocosa hasta la profundidad. Para los materiales presentes en nuestro subsuelo se ha tomado $C_i = 900 \text{ Julios/kg}^\circ\text{C}$.

T_i = Temperatura a la profundidad i . A falta de datos directos de sondeos de la zona de cálculo se toma el valor de temperatura estimada para un gradiente geotérmico de $30 \text{ }^\circ\text{C/km}$.

T_0 = Temperatura media anual en superficie.

El método volumétrico permite fijar con buena precisión los recursos geotérmicos mediante el concepto de elementos finitos. De hecho, casi siempre es posible subdividir la región de estudio en zonas distintas, en función de sus condiciones geológicas. En vertical, la separación debe realizarse en forma de unidades litológicas a las que se atribuya una potencia, porosidad y temperaturas medias.

En zonas donde la información geológica, térmica o de sondeos es insuficiente o inadecuada, siempre se puede estimar la temperatura del almacén mediante geotermometrías químicas. Esta aproximación requiere fijar un techo y una base al almacén y suponer que sus aguas se hallan en equilibrio térmico con la roca del acuífero.

Para cada una de estas unidades o formaciones geológicas permeables se calcula el calor almacenado –heat in place, en inglés–.

De acuerdo con la formulación recomendada por la Unión Europea en sus Atlas de Recursos Geotérmicos, este calor almacenado se estima con la siguiente relación:

$$H_0(\text{Julios}) = [(1-\emptyset) \rho_r C_r + \emptyset \rho_a C_a] \cdot (T_r - T_0) \cdot S \cdot e$$

En la que:

H_0 = Calor almacenado en la formación (Julios)

\emptyset = Porosidad eficaz de la formación (adimensional)

ρ_r = Densidad de la roca almacén (kg/m^3)

- C_r = Capacidad calorífica de la formación (Julios/kg°C)
- ρ_a = Densidad del agua de formación. A falta de datos se toma 1.000 kg/m³.
- C_a = Capacidad calorífica del agua de formación: 4.186 Julios/kg°C
- T_t = Temperatura media del almacén
- T_0 = Temperatura media anual en superficie. Se ha tomado 16 °C como media para toda Andalucía.
- S = Superficie en planta del área considerada del almacén, por lo tanto se refiere a la superficie efectiva de la parte de la formación geológica que puede considerarse almacén
- e = Espesor medio útil del almacén geotérmico. Si no se tienen datos concretos se utiliza el mayor espesor conocido de la formación geológica.

Como ya se ha referido, solo una pequeña fracción del recurso accesible de base puede extraerse a la superficie constituyendo el recurso geotérmico (H_R). Para su evaluación debe conocerse la porosidad eficaz de la formación almacén y fijar el modelo de transporte del fluido a la superficie, sea en forma de agua, vapor o mezcla bifásica, así como el sistema de gestión de los fluidos de rechazo-reinyección o eliminación en superficie.

La cantidad de energía geotérmica extraíble (H_R) a partir de un volumen dado de roca y agua dependerá de una serie de factores geológicos y físicos, tales como del modelo de producción elegido, la temperatura y la presión de producción en cabeza de pozo. Ello implica, pues, la necesidad de disponer de una serie de parámetros que sólo resultan cuantificables cuando existen pozos en producción en la zona y su ingeniería de producción está resuelta, lo que no siempre es posible. En tales circunstancias, muchos autores han optado por utilizar el llamado "**factor de recuperación**", descrito en los términos que se expresan en el siguiente apartado.

2.4 Factor de Recuperación

En línea con lo expuesto anteriormente acerca de la utilización en geotermia de conceptos derivados de la industria minera, resulta de especial importancia hacer distinción entre la cantidad total de sustancia mineral que contiene un depósito y la parte de éste que puede ser extraída bajo unas condiciones económicas y tecnológicas concretas. Este factor recibe el nombre genérico de "recuperación" y equivale al contenido del depósito total multiplicado por un "factor de recuperación". Para algunas menas metálicas el factor de recuperación es casi igual a la unidad, por lo que no necesita ser tomado en cuenta en la evaluación de recursos y reservas. Para otros minerales y combustibles fósiles, sin embargo, una fracción significativa del depósito no puede ser nunca explotado.

La extensión del término "factor de recuperación" a la energía geotérmica permite definir el **factor de recuperación geotérmica como la relación entre energía geotérmica extraída y utilizada y la total contenida originalmente en un volumen subterráneo dado de roca y agua.**

El factor de recuperación (R) permite, pues, expresar la energía geotérmica extraíble como un porcentaje de la total contenida en un volumen determinado (V_i) del subsuelo, es decir:

$$H_R = R \times H_i$$

El factor de recuperación R depende, lógicamente, del mecanismo de producción, de la porosidad eficaz de la formación que constituye el volumen V_i y de la diferencia de temperatura entre el almacén y la cabeza de pozo.

En la práctica, en caso de necesidad de reinyección de la salmuera geotérmica (lo más generalizado) su valor es:

$$R = 0,33 \cdot \frac{T_t - T_i}{T_t - T_0}$$

Siendo T_t la temperatura de producción, T_i la temperatura de inyección y T_0 la temperatura media anual en superficie. En una primera aproximación y ante la falta de conocimiento del valor T_i , para la realización de estimaciones se aplica $R = 0,3$ (aún sabiendo que puede llegar a adquirir valores ligeramente más bajos para T_i elevados).

En caso de no reinyectarse la salmuera fría (casos muy poco probables hoy en día), el valor de R es aproximadamente 0,1.