

ENERGÍA GEOTÉRMICA EN LA ARGENTINA

Palabras clave: geotermia, energía, renovable, transición, Argentina.

Key words: (geothermal, energy, renewable, transition, Argentina).

En los últimos años las alteraciones del sistema climático de la Tierra se han intensificado con consecuencias cada vez más graves e irreversibles para los ecosistemas y las personas que viven en ella. La problemática del calentamiento global, causada principalmente por el uso de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas, está obligando a repensar la forma que habitamos nuestro planeta. Resulta inminente impulsar acciones que permitan una transición hacia fuentes de energía más amigables con el ambiente. Parte de la solución, no solo se encuentra en la diversificación de la matriz energética de los países, sino también en el uso sostenible de los recursos disponibles. Además, de la energía que nos provee el sol, el agua, el viento y la biomasa, existe una menos difundida y se conoce como "energía geotérmica". Este tipo de recurso que nace en el interior de la Tierra es susceptible de ser aprovechado como calor o para la generación de energía eléctrica encontrándose prácticamente alrededor de todo el mundo. Argentina, no es ajena a esto, se estima que el país tiene un potencial de 490 a 2.010 MWe de generación eléctrica de origen geotérmico (Gawell et al., 1999; Chiodi, et al., 2020). El presente trabajo describe la energía geotérmica en general, con una breve reseña histórica de su evolución, el estado actual, los desafíos y oportunidades para su desarrollo en Argentina.

Geothermal Energy in Argentina

In recent years, alterations to the Earth's climate system have intensified, with increasingly serious and irreversible consequences for ecosystems and the people who live on Earth. The problem of global warming, caused mainly by the use of fossil fuels such as coal, oil and gas, is forcing us to rethink the way we inhabit our planet. It is imminent to promote actions that allow a transition to more environmentally friendly energy sources. Part of the solution lies not only in the diversification of the energy matrix of countries, but also in the sustainable use of available resources. In addition to the energy provided by the sun, water, wind and biomass, there is a less widespread type of energy known as "geothermal energy". This type of resource that is born in the interior of the Earth is susceptible of being used as heat or for the generation of electric energy and can be found practically all over the world. Argentina is no stranger to this; it is estimated that the country has a potential of 490 to 2,010 MWe of electricity generation of geothermal origin (Gawell et al., 1999; Chiodi, et al., 2020). This work describes geothermal energy in general, with a brief historical review of its evolution, current state, challenges and opportunities for its development in Argentina.

■ INTRODUCCIÓN

Según el informe sobre las Perspectivas de la Transición Energética Mundial 2021 de IRENA (IRENA, 2021b), el sector energético, conocido por su lentitud en los cambios, está experimentando una transición dinámica. Los imperativos del cambio climático, la pobreza y la seguridad energética para un desarrollo sostenible, resiliente, justo, inclusivo y equitativo han adoptado como solución esencial a las energías renovables y las tecnologías relacionadas. Los impulsores de las políticas, los desarrollos tecnológicos y la coo-

peración internacional han hecho que estas tecnologías pasen de ser un nicho a una corriente principal, especialmente en la última década. Incluso ante las turbulencias e inconvenientes causados por la pandemia del COVID-19, los sistemas eléctricos basados en las energías renovables demostraron una notable resiliencia y fiabilidad técnica.

Existe un consenso general en torno a una transición energética basada en fuentes y tecnologías renovables, que aumente la eficiencia y la sostenibilidad, ya que es la única manera de intentar limitar el

calentamiento global a 1,5 °C en 2050. Hace solo algunos unos años, el enfoque centrado en las energías renovables que promulgaban algunos actores se consideraba idealista. Hoy en día, incluso, algunos de los actores energéticos más conservadores se han dado cuenta de que es la única opción en la lucha contra el cambio climático y un desarrollo sostenible para las generaciones venideras. Este cambio de opinión tan profundo y generalizado se basa en una evidencia innegable, no solo de los graves problemas a los que se enfrenta el mundo actual, sino también de las tendencias en las tecno-

■ Cristian Picighelli¹

¹ Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires

E-mail: c.picighelli@gmail.com

logías, las políticas y los mercados que han ido remodelando el sector energético.

Las soluciones innovadoras están reconfigurando el sistema energético y abriendo nuevas posibilidades para un futuro descarbonizado. Se han logrado avances significativos en la movilidad eléctrica, el almacenamiento en batería, las tecnologías digitales y la inteligencia artificial, entre otros. Estos cambios también están llamando la atención sobre la necesidad de una explotación y gestión sostenibles de los recursos y la inversión en economía circular. Las redes inteligentes, reforzadas por políticas y mercados facilitadores, están mejorando la capacidad del sector eléctrico para hacer frente a la variabilidad de las energías renovables (IRENA, 2021a).

El creciente número de países que se comprometen con estrategias de emisiones netas cero de carbono, indica un cambio imperante en el discurso climático mundial. Se observan tendencias similares en todos los niveles de gobierno y en el sector privado.

Argentina, inicia su interés en las energías renovables en el año 1998 a través de la Ley N° 25.019 (Ley 1998) que fomenta la generación de energía eléctrica solar y eólica, pero no se logran avances significativos. En el año 2006 se dicta la Ley N° 26.190 (Ley 2006) que fomenta la generación eléctrica a partir de fuentes renovables, como la energía eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás, estableciendo como objetivo alcanzar un 8 % de generación renovable en la matriz energética en un plazo de 10 años. También sin avances significativos. Debido a esto, en el año 2015 se dicta la Ley N° 27.191 (Ley 2015) que modifica

la Ley anterior extendiendo el plazo de la participación del 8 % de fuentes renovables hacia fines del 2017 y establece la "Segunda etapa de fomento nacional de fuentes de energía renovables para la generación de energía eléctrica" y pone como objetivo final alcanzar un 20 % de generación de energía proveniente de fuentes renovables para finales del 2025. Además, establece que los grandes usuarios del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) y las grandes demandas que sean clientes de los prestadores del servicio público de distribución o de los agentes distribuidores con demandas mayores o iguales a 300 kW deberán cumplir efectiva e individualmente con los objetivos indicados. A tales efectos podrán autogenerar o contratar la compra de energía proveniente de diferentes fuentes renovables. Gracias a estas normativas y a través del programa RenovAr (RenovAr), el gobierno nacional adjudicó 147 proyectos de energía renovables, equivalentes a 4.466,5 MW de capacidad instalada con el uso diferentes fuentes y tecnologías: eólica, solar, biomasa, biogás y pequeñas centrales hidroeléctricas.

Sin embargo, y a pesar de que la energía geotérmica está incluida en las leyes citadas anteriormente, no se incluyó en los pliegos de licitación. En este marco, el gobierno está trabajando para licitar el primer Acuerdo de Compra de Energía (PPA) de origen geotérmico para el Proyecto Geotérmico Copahue, en Neuquén. De esta manera, se pretende fomentar el desarrollo de otros proyectos geotérmicos en fase de prefactibilidad y promover el desarrollo de la energía geotérmica en Argentina. Se estima que el país tiene un potencial de 490 a 2.010 MWe (Gawell et al., 1999; Chiodi, et al., 2020) para la generación de energía eléctrica a partir de sus recursos geotérmicos. En este sentido, los sistemas geotérmicos de

alta temperatura más interesantes se encuentran en el sector occidental (Zonas Volcánicas Central y Sur de los Andes). En este contexto, existen seis proyectos orientados a la generación de energía eléctrica que son los más desarrollados: Copahue y Domuyo (Neuquén), Tuzgle (Jujuy), Tocomar (Salta), Los Despoblados (San Juan) y Termas del Río Hondo (Santiago del Estero) y otros que se encuentran en etapa de exploración inicial: Volcán Socompa (Salta), Caldera del Cerro Blanco y Cerro Galán (Catamarca), Volcán Peteroa, Los Molles y Laguna del Maule (Mendoza) (Chiodi et al., 2020).

■ ENERGÍA GEOTÉRMICA

La energía geotérmica es el calor que se genera en el interior de la Tierra y puede ser usada directamente para calentamiento o transformada en electricidad. Una ventaja de este recurso sobre algunas otras fuentes de origen renovable es que está disponible todo el año en comparación con la energía solar y eólica que tiene variabilidad e intermitencia durante el día y durante el año. Además, la energía geotérmica puede encontrarse alrededor de todo el mundo. Sin embargo, para propósitos de generación eléctrica se necesitan recursos de media y alta temperatura que se encuentran generalmente cerca de zonas volcánicas y tectónicamente activas.

Es un recurso energético que tiene un gran potencial de crecimiento. Se estima que la cantidad de calor contenida en los primeros 10 km de la corteza terrestre equivale a más de 50.000 veces la energía del todo el petróleo y gas en el mundo (Shere, 2013). Además, existe un fuerte argumento para el despliegue de la energía geotérmica y es que los costos de la generación eléctrica geotérmica se espera que sean más competitivos y tengan una tendencia

en descenso hacia el año 2050 (van der Zwaan y Longa, 2019).

La energía geotérmica es un recurso que se repone naturalmente en una escala de tiempo humana, por lo que no se ve afectada por el agotamiento global de sí misma como ocurre con los combustibles fósiles. Adicionalmente, la generación de energía geotérmica contribuye a la mitigación del cambio climático como así también los riesgos asociados a la salud pública y al ambiente por reducción en la emisión de gases de efecto invernadero, tiene costos de funcionamiento relativamente menores con suministro de energía eléctrica de base y con factores de capacidad considerablemente mayores si se lo compara con recursos de energía convencionales como los hidrocarburos y también con otras fuentes de energía renovable.

Es la fuente renovable casi perfecta para la generación de electricidad. Es un recurso autóctono, que no implica deforestación intensiva o extracción y transporte de sustancias minerales con los impactos asociados, no depende de factores climáticos, como viento, insolación o regímenes de precipitaciones, tiene comparativamente bajas emisiones de dióxido de carbono y otros gases, y no genera desechos contaminantes o radioactivos. A su vez, las instalaciones no requieren mucho espacio, su impacto en el paisaje es mínimo en comparación con otras energías renovables, no presenta peligros para la fauna, las aves en particular, y en general sus impactos son mitigables. La generación de energía geotérmica es una tecnología madura¹, que produce energía de base con elevados factores de capacidad, inclusive algunas plantas superan el 90 %, y en ciertas condiciones puede modular la carga para acomodarse a la demanda eléctrica. Además, tiene costos de operación y mantenimiento bajos (Bona y Coviello, 2016).

■ CARACTERIZACIÓN Y USOS DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS

Según Boden (2017) se han aplicado una variedad de métodos o criterios para analizar los sistemas geotérmicos, reflejando su naturaleza compleja y multidisciplinaria. Se enumeran a continuación algunos de los principales esquemas de caracterización empleados:

- Transferencia de calor: sistemas convectivos y sistemas conductivos.
- Tipos de fuentes de calor: presencia o ausencia de roca fundida o magma subyacente.
- Entornos geológicos o tectónicos: ubicación a lo largo o cerca de los límites de las placas o dentro de las porciones interiores de los continentes.
- Ambientes de entalpía o contenido de calor bajo, moderado y alto.
- Tipo de fluido presente en el reservorio geotérmico: dominado por líquido o vapor.
- Usos de sistemas geotérmicos: generación de energía eléctrica, uso directo de fluidos geotérmicos y bombas de calor geotérmicas.

En el presente trabajo no se detallarán todos los esquemas de clasificación ya que supera el alcance del mismo. Se explicará la caracterización por contenido de calor y finalmente la clasificación de los sistemas geotérmicos en función de sus usos.

La Figura 1 muestra esquemáticamente cómo funciona un sistema geotermal de convección. El agua fría en la superficie se filtra hacia abajo a lo largo de fracturas en las rocas, hasta una cierta profundidad donde se calienta desde abajo por magma o roca anormalmente caliente (intrusión magmática o cuerpo caliente). El agua calentada

puede fluir lateralmente a lo largo de un horizonte de roca permeable cubierto por una roca relativamente impermeable, o el agua puede subir a lo largo de posibles fracturas en la roca debido a fuerzas de flotación entre el fluido descendente frío y el fluido ascendente caliente. De lo contrario, el fluido circulará en la roca permeable (reservorio) subiendo donde más caliente está, en el medio, y descendiendo donde más frío está a lo largo de los lados del reservorio.

El gráfico de la izquierda de la Figura 1 ilustra los cambios de temperatura del fluido a diferentes profundidades que corresponden a la sección transversal de la figura. Un rasgo característico de un sistema de convección es el perfil isotérmico de temperatura con la profundidad (ver los puntos C y D). Por el contrario, el flujo de calor conductivo se indica para los puntos C, F y G, donde la temperatura aumenta constantemente con la profundidad porque el flujo de calor conductivo es mucho más lento que el flujo de calor convectivo. Otra zona a identificar es la curva E a D y su proyección (línea discontinua de la curva 1). Esta es la curva del punto de ebullición con la profundidad debido al aumento de presión. La curva que se muestra aquí es para agua pura, pero cambiaría a temperaturas más altas para una profundidad dada con un aumento de sólidos disueltos o si el componente de la presión litoestática ^(a) está presente además de la columna hidrostática.

Los recursos geotérmicos también se pueden clasificar de baja, media y alta temperatura como se muestra en la Figura 2. Los rangos utilizados son arbitrarios y no poseen un consenso para definirlos. La temperatura es utilizada como la característica de clasificación porque es un parámetro simple. La clasificación más difundida es la de Muffer y

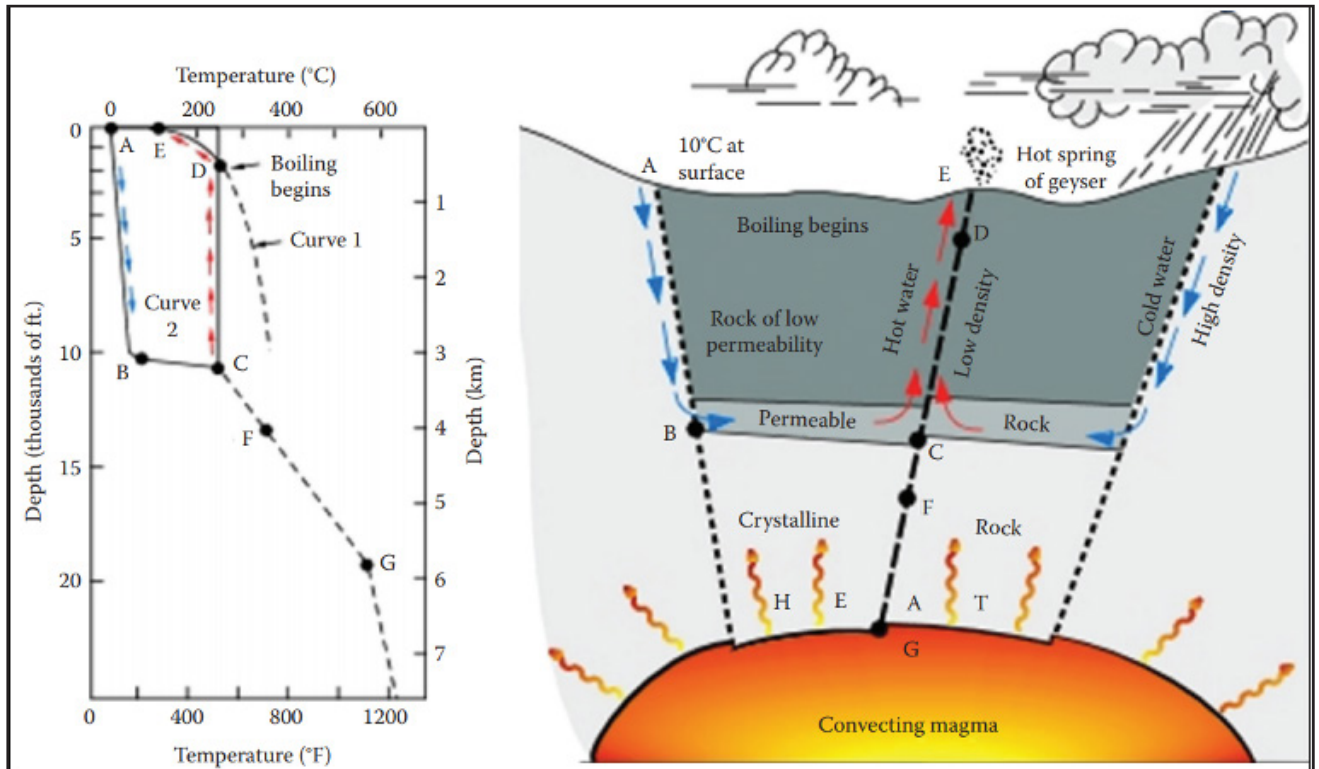


Figura 1: Esquema del funcionamiento de un sistema geotérmico. El gráfico muestra el cambio de temperatura de los fluidos geotérmicos por encima de una fuente de calor (intrusión magmática). Las flechas azules indican la trayectoria del agua subterránea densa, fría y recargada que se calienta de forma conductiva desde abajo. Las flechas rojas indican la circulación de agua caliente que asciende por convección. Las letras A a G del gráfico enseñan las posiciones que se muestran en el croquis de la sección transversal. (Boden, 2017).

Cataldi (1978) en la que el recurso geotérmico es de temperatura baja cuando los fluidos tienen valores que van hasta los 90 °C, media de 90 °C hasta 150 °C y alta cuando los fluidos tienen más de 150 °C. Los recursos hidrotermales caracterizan a los reservorios o acuíferos naturales en función de la energía geotérmica disponible en profundidad. Estos acuíferos se pueden dividir en recursos de alta, media y baja entalpía. La entalpía es una propiedad de un sistema termodinámico y es igual a la energía interna del sistema más el producto de su presión y volumen y se mide en unidades de energía por unidades de masa. Como variable de estado, la entalpía es básica para los cálculos de eficiencia en los procesos de vapor. La geotermia, como se

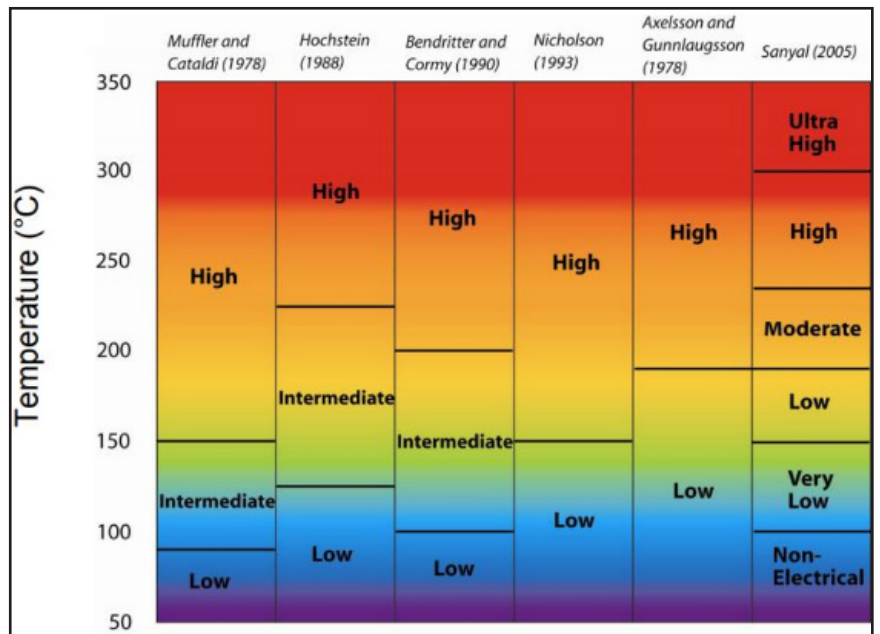


Figura 2: Diferentes clasificaciones de los recursos geotérmicos en función de su temperatura (Gonzalez, 2019).

dijo, a diferencia de la energía solar y eólica, es un recurso para la generación de energía eléctrica de base, capaz de proveer energía 24 horas al día durante todo el año, similar a las centrales termoeléctricas tradicionales que funcionan con combustibles fósiles. Ciertos tipos de aprovechamientos de energía hidráulica también son considerados recursos de energía de base, pero su producción puede variar considerablemente dependiendo de los niveles de precipitación en la cuenca hidrológica de drenaje.

Esta fuente de energía puede ser utilizada de tres formas diferentes: generación de electricidad, uso directo y en bombas geotérmicas de calor. Estos usos dependen de la temperatura y la profundidad a la que se encuentra el recurso geotérmico (Figura 3). La generación de energía eléctrica requiere temperaturas elevadas, generalmente mayor a los 100 °C y es el tipo de uso me-

nos extendido, estando restringida, en un principio, solo a zonas geológicamente favorables, como lo es a lo largo o cerca de los límites de las placas tectónicas de la Tierra.

Otra forma de aprovechamiento es el uso directo, la cual requiere fluidos de elevada temperatura, pero menor a la utilizada en generación eléctrica (generalmente entre 50 y 100 °C), y se utiliza en el calentamiento de edificios y ciudades, como así también en una variedad de aplicaciones como piscicultura (acuicultura), secado de frutas y verduras, procesamiento de madera, invernaderos, diversas industrias y por supuesto, en baño termales. Los fluidos para uso directo también están restringidos a zonas geológicamente favorables, pero también se puede acceder a ellos con perforaciones que alcancen dicha temperatura. Los fluidos de temperatura media o moderada están más extendidos debido a que son más comunes que los flui-

dos de alta temperatura requeridos para generación eléctrica.

La tercera forma de utilización de la energía geotérmica es a través de la utilización de bombas geotérmicas de calor que pueden utilizarse prácticamente en cualquier parte del planeta. Este tipo de aprovechamiento es también una forma de uso directo del recurso geotermal, pero en el extremo de baja temperatura. En lugar de utilizar fluidos geotérmicos de forma directa, este tipo de tecnología utiliza la Tierra como reservorio térmico depositando en el mismo el calor en el verano y extrayéndolo en invierno. Esto se logra ya que la temperatura promedio de la Tierra a unos pocos metros por debajo de la superficie está dentro de un rango limitado de 10 a 15 °C durante todo el año en gran parte del planeta. Si no hay disponibilidad de acceso fácil a fluidos geotérmicos, como es el caso de la mayoría de los lugares del planeta, los sistemas de bombas de calor son la forma más eficiente de calentar y refrigerar edificios por dos razones principales: es más fácil mover el calor que transformarlo y solo requiere una pequeña cantidad de electricidad para el funcionamiento de las bombas de calor. De hecho, las bombas geotermales comprenden aproximadamente el 71 % de la capacidad instalada de uso directo.

■ IMPACTOS AMBIENTALES DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA GEOTÉRMICA

Los Proyectos Geotérmicos integran estudios de impacto ambiental (EIA) en todas las etapas de su desarrollo. Estos deben potenciarse con estudios focalizados en las poblaciones y entornos locales determinando los impactos sociales, culturales, económicos y políticos antes, durante y posterior al desarrollo de los proyectos.

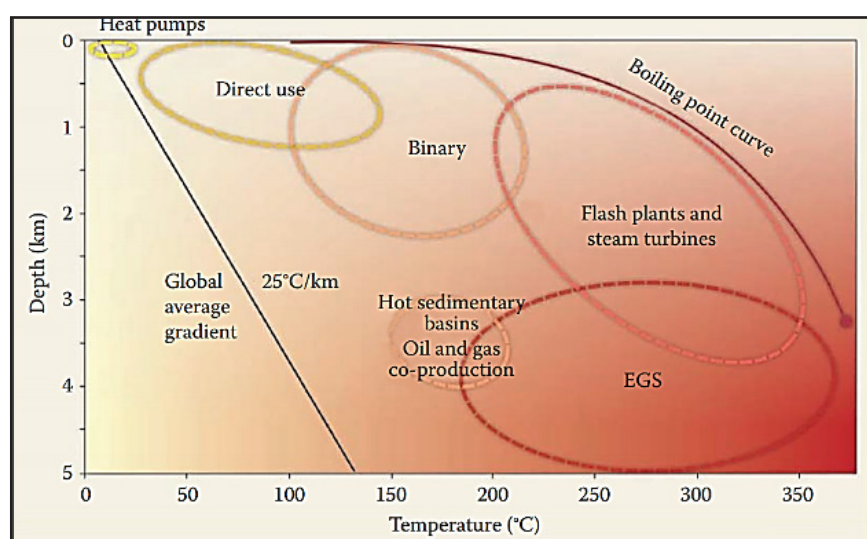


Figura 3: Gráfico de temperatura versus profundidad que muestra las distintas formas de aprovechamiento de la energía geotérmica, desde bombas de calor cercanas a la superficie terrestre hasta sistemas geotérmicos mejorados (Enhanced Geothermal Systems, EGS) que se encuentran en etapa temprana de desarrollo y se alcanzan a profundidades mayores a la de los reservorios generadores de energía que actualmente se están utilizando (Boden, 2017).

La experiencia demuestra que, si no se realiza un trabajo social integral con las comunidades locales antes de cada acción del proyecto, los conflictos etnopolíticos pueden llevar a la cancelación de los proyectos. El trabajo sociocultural del entorno es fundamental en todas las etapas de desarrollo para el éxito de los proyectos geotérmicos.

El grado de sostenibilidad de la energía geotérmica depende principalmente de los siguientes factores (Gonzalez, 2019):

- Características de la localización geográfica.
- El tipo de planta de generación eléctrica.
- Las propiedades del yacimiento geotérmico y su potencial energético.

Se detallarán específicamente los impactos ambientales de la generación eléctrica geotérmica referidos al manejo de agua, uso de suelo y emisiones gaseosas. No se abordarán los impactos relacionados con la perforación de pozos ya que son similares a los de la industria petrolera y excede el alcance del presente trabajo.

■ MANEJO DEL AGUA

Los fluidos geotérmicos provenientes de los pozos se dirigen a la planta para su separación en vapor y líquido, el primero se utiliza para la generación eléctrica y el segundo se reinyecta, al igual que el vapor condensado.

El manejo del agua es importante y significativo, lo que puede llevar a pérdidas de fluidos residuales, por rotura y falla en equipos y tuberías de conducción. Debe existir un con-

trol y monitoreo riguroso para evitar y controlar dichas pérdidas, como así también, planes de contingencia para mitigar pérdidas de fluido evitando impactos negativos en el entorno (Barcelona, 2020).

■ USO DE SUELO

El uso del suelo o la modificación del paisaje puede generar conflictos culturales, socioeconómicos y socioculturales. Comparativamente la generación eléctrica geotérmica impacta mucho menos en el uso de suelo que la generación de energía de otras fuentes como se observa en la Figura 4, donde se presenta el uso de suelo en m^2 por GWh de energía producida. Se observa que para producir anualmente 1 GWh la producción geotérmica utiliza $300 m^2$, área bastante menor que los $3.800 m^2$ requeridos para la generación por combustibles líquidos o gas, los $3.600 m^2$ para la solar y los $1.000 m^2$

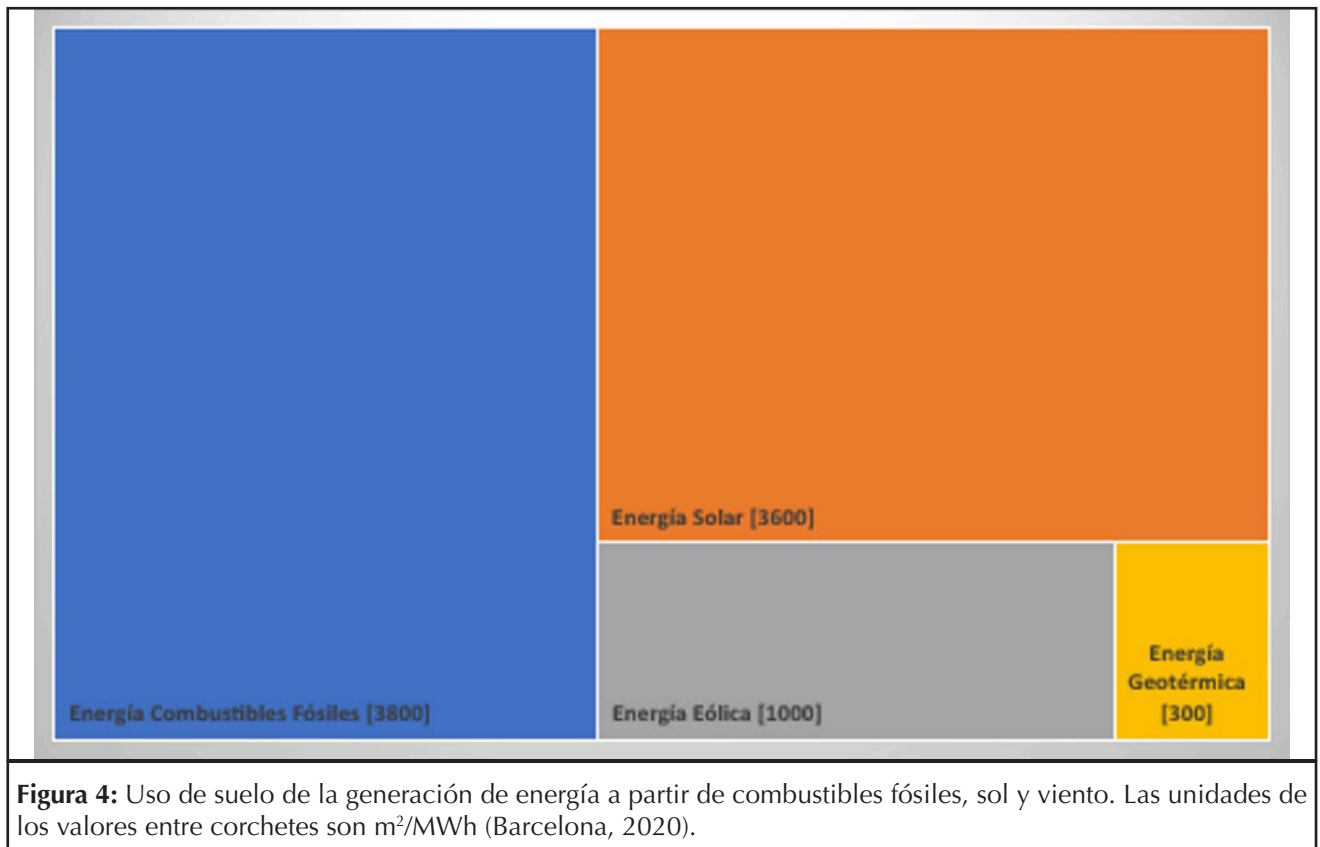


Figura 4: Uso de suelo de la generación de energía a partir de combustibles fósiles, sol y viento. Las unidades de los valores entre corchetes son m^2/MWh (Barcelona, 2020).

para la generación de energía eólica (Barcelona, 2020).

■ EMISIONES GASEOSAS

Las emisiones de las plantas de energía geotérmica son mínimas en comparación con las plantas de electricidad basadas en la combustión de combustibles fósiles. El sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono son los principales gases de emisión de la generación de energía geotérmica. La presencia y concentración de posibles contaminantes del aire puede variar dependiendo de las características de la fuente geotérmica. La Tabla 1 muestra los kg de CO₂ y H₂S que se emiten por MWh generado con geotermia y combustibles fósiles. Se observa que las emisiones geotérmicas son de 81 kg de CO₂ y 0,1 kg de H₂S para generar 1 MWh, valores bastante menores que los 950 kg de CO₂ y 0,5 kg de H₂S emitidos para generar 1 MWh con hidrocarburos (Barcelona, 2020).

■ GEOTERMIA EN ARGENTINA

Argentina cuenta con las condiciones necesarias para convertirse en uno de los mercados de geotermia más atractivos de la región. Las características geológicas con gran presencia de manifestaciones geotermiales localizadas en numerosas zonas del territorio nacional son una gran oportunidad para favorecer el desarrollo de distintos usos de la geotermia (Conde y Johanis, 2021).

El Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y el Servicio Geológico Minero de Argentina (SEGEMAR) son los principales organismos que promueven la investigación, el desarrollo y la innovación de los recursos geotérmicos en Argentina, a través de la financiación de proyectos de investigación orientados a producir el conocimiento necesario para la evaluación precisa del potencial

Tabla 1: Emisiones gaseosas de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno de la generación eléctrica geotérmica y combustibles fósiles. Se observa que la primera, con 81 kg/MWh de CO₂ y 0,1 kg/MWh de H₂S, es baja en emisiones respecto de la segunda con 950 kg/MWh de CO₂ y 0,5 kg/MWh de H₂S (Barcelona, 2020).

	CO ₂ [kg/MWh]	H ₂ S [kg/MWh]
Geotermia	81	0,1
HC Fósiles	950	0,5

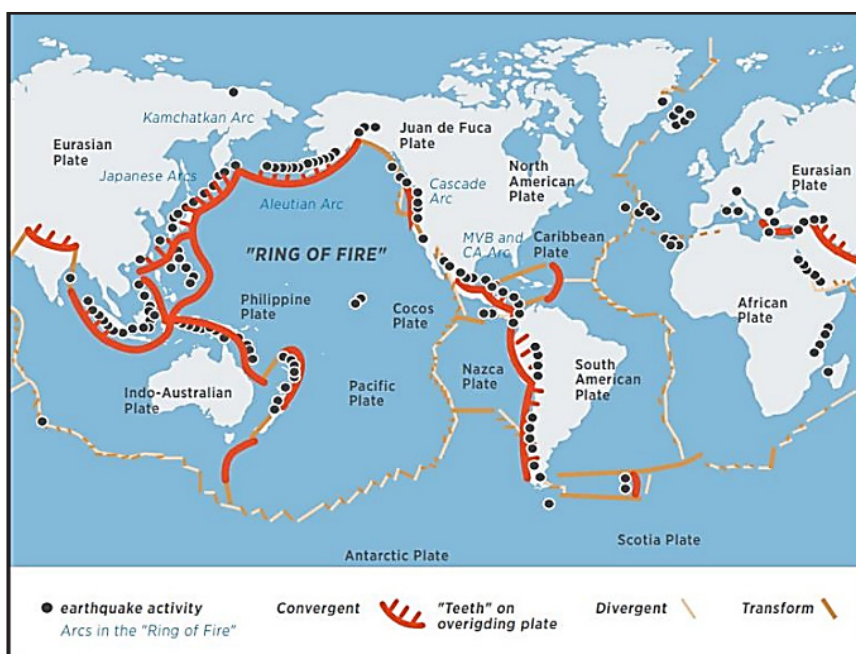


Figura 5: Tectónica de placas y actividad sísmica global. Puede observarse el conocido "Anillo de Fuego del Pacífico" que concentra las zonas de subducción oceánica más importantes del mundo y se caracteriza por una intensa actividad sísmica y volcánica (Gonzalez, 2019).

geotérmico y, en última instancia, la implementación del mismo como una alternativa energética viable.

Si bien los países andinos de América del Sur constituyen lugares prometedores para la explotación geotérmica debido a su posición en el Cinturón de Fuego del Pacífico (Figura 5), donde las características magmáticas y tectónicas favorecen el desarrollo de sistemas geotérmicos, solo un proyecto se encuentra generando electricidad en el conti-

nente, la planta "Cerro Pabellón" en Chile de 48 MWe de potencia, inaugurada en septiembre del 2017. Previo a esto, estuvo en funcionamiento un corto periodo de tiempo, hasta el año 1996, una planta prototipo de tipo binaria de 0,67 MWe en el campo geotérmico Copahue en la provincia de Neuquén, Argentina.

Argentina tiene un potencial estimado de generación eléctrica geotérmica de entre 490 y 1.010 MWe, que podría aumentar hasta

los 2.010 MWe en condiciones de desarrollo tecnológico más avanzado (Gawell, et al. 1999). A pesar del potencial prominente de los recursos geotérmicos, solo es utilizado para uso directo (Figura 6) en balneología (52,7 %), uso doméstico (24,6 %), uso industrial (6,7 %), derretimiento de nieve (5,4 %), calefacción doméstica (4,6 %), invernaderos (4,5 %) y acuicultura (1,5%) (Chiodi et al., 2020).

Desde el punto de vista de la generación de energía eléctrica, los sistemas geotérmicos de alta temperatura más interesantes en Argentina se encuentran en el sector occidental (Zonas Volcánicas Central y Sur de los Andes), probablemente asociados al arco volcánico del Neógeno-Cuaternario. Mientras que, hacia el este, los sistemas geotérmicos de media a baja temperatura son asociados a la circulación profunda de aguas meteóricas

En la década de los años 70 el objetivo estuvo estrictamente orientado a la generación de energía eléctrica, realizándose los primeros trabajos de reconocimiento geológico y geoquímico con el fin de seleccionar áreas para futuros estudios de detalle en diferentes provincias del país. Luego se continuó con estudios de prefactibilidad, llegando a la factibilidad en algunos campos geotérmicos.

En los últimos años, con el avance en el conocimiento de los recursos termales y en función de las características geológicas y los abundantes recursos energéticos que tiene la Argentina, la utilización de los fluidos termales en la modalidad de uso directo surge como una alternativa interesante para contribuir al desarrollo de las economías regionales. La explotación de este recurso, en particular los de baja temperatura, puede cumplir un rol

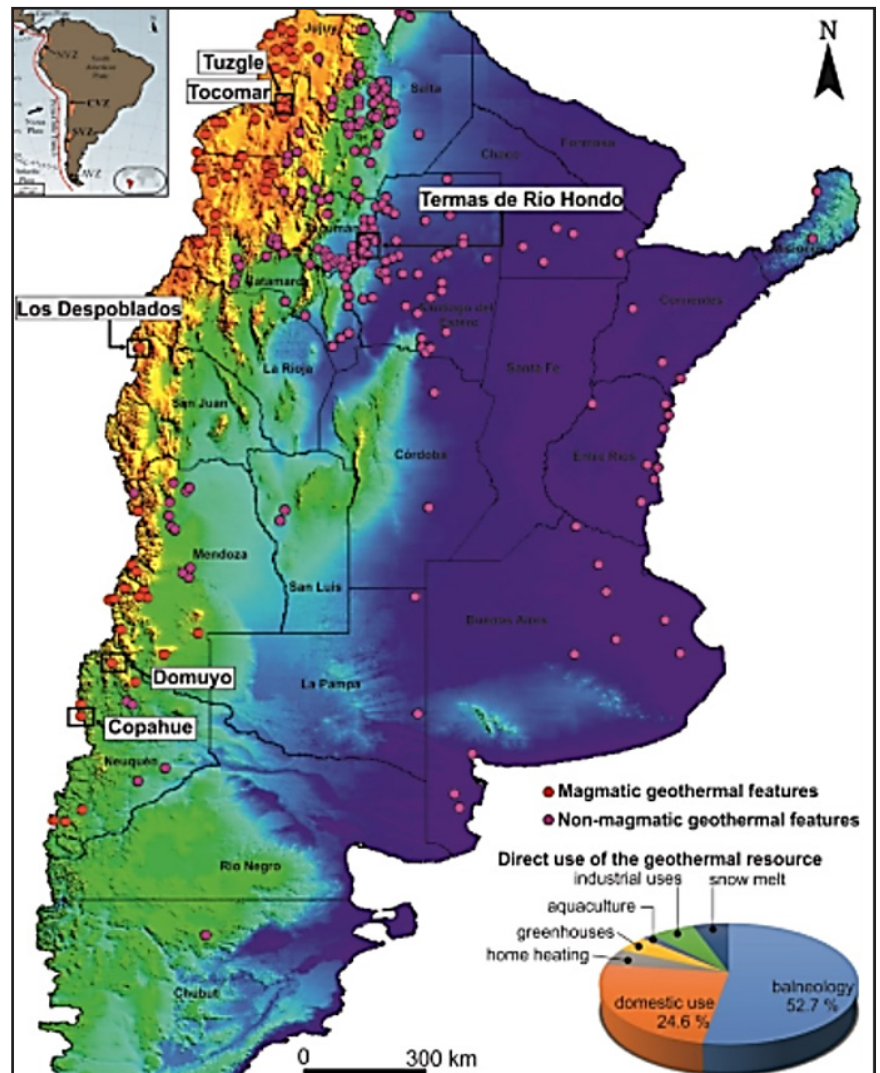


Figura 6: Distribución de los sistemas geotérmicos en Argentina. Sector occidental: sistemas geotérmicos magmáticos, Centro y Este: sistemas geotérmicos no magmáticos (círculos morados). Proyectos orientados a la generación de energía eléctrica: Copahue, Domuyo, Tuzgle, Tocomar, Los Despoblados y Termas de Río Hondo. También se muestra la distribución del uso directo del recurso geotérmico (Chiodi et al., 2020).

importante en la solución de numerosos problemas locales y mejorar la vida de comunidades pequeñas y/o aisladas. Evidentemente para tal fin se debe remarcar la necesidad de una evaluación cuidadosa desde el punto de vista técnico, económico y social de la situación de cada área en particular antes de emprender las acciones pertinentes.

El conocimiento de las manifestaciones termales y sus característi-

cas constituyen el punto de partida para exploración y cuantificación de sistemas geotérmicos capaces de sustentar proyectos de generación de energía eléctrica o de uso directo. Un análisis general de la situación actual en la Argentina indica un diagnóstico positivo y una perspectiva de constante crecimiento en la utilización de los recursos geotérmicos. Así lo demuestran los numerosos y variados emprendimientos que se han desarrollado en nuestro

país en los últimos años: desde nuevos complejos termales terapéuticos recreativos que se suman a las ya tradicionales termas de nuestro país, hasta emprendimientos relacionados con invernaderos, piscicultura, usos industriales y domésticos y calefacción de viviendas (Naón, 2020; Pesce y Miranda, 2000; Pesce y Miranda 2003).

A partir del año 2017, la Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética (SSERyEE) retomó la agenda del desarrollo de la generación eléctrica a partir de energía geotérmica, por lo que mediante la interacción en conjunto

con el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), la Agencia de Inversiones (ADI-NQN), Secretaría de Minería y/o Energía Provinciales, y Organismos Internacionales, se está trabajando en la recopilación y análisis de las áreas con potencial de aprovechamiento geotérmico de energía.

Si bien en la Argentina existen más de 300 puntos de interés, actualmente se están estudiando 18 prospectos geotérmicos (Naón, 2020), que son mostrados en la Tabla 2. El SEGEMAR ha seleccionado para una primera etapa, estos 18 prospectos y proyectos evaluados según un mar-

co geológico propicio para la existencia de sistemas geotermales y una ubicación geográfica favorable para abastecer de energía al mercado local, el interconectado provincial y nacional. Al respecto se tuvieron en cuenta regiones donde el suministro de energía eléctrica está ausente, es insuficiente o se provee a través de generadores a combustible fósil. Se incluyó en este escenario regiones con presencia de proyectos mineros en actividad, industrias, centros turísticos y poblaciones donde la perspectiva de contar con generación de energía autóctona estimularía la inversión y el desarrollo. Debido a que el potencial geotérmico

Tabla 2: Prospectos y proyectos geotérmicos para generación eléctrica de interés en la República Argentina (Naón, 2020).

Proyecto	Provincia	Estado del Proyecto
Queñal, Coyahuaima, Co. Paniza	Jujuy	Etapas de reconocimiento
Volcán Tuzgle	Jujuy	Exploración avanzada
Tocomar, Pompeya, Antuco	Salta	Exploración avanzada
Caldera Aguas Caliente – Incachule	Salta	Exploración avanzada
Salar de Rincón	Salta	Exploración avanzada
Rosario de la Frontera	Salta	Prefactibilidad
Volcán Socompa	Salta	Exploración avanzada
Volcán Lulllaillaco	Salta	Exploración avanzada
Caldera Cerro Blanco	Catamarca	Exploración avanzada
Volcán Ojos del Salado	Catamarca	Etapas de reconocimiento
Los Desoblados – Valle del Cura	San Juan	Exploración avanzada
Gollete – Bañitos – Valle del Cura	San Juan	Exploración avanzada
Cuenca de Tucumán – Santiago del Estero	Tucumán – Santiago del Estero	Exploración avanzada
Volcán Peteroa – Azufre – Planchón	Mendoza	Exploración avanzada
Laguna El Maule	Mendoza	Etapas de reconocimiento
Domuyo	Neuquén	Prefactibilidad
Volcán Copahue	Neuquén	Factibilidad
Cuenca del Colorado – Pedro Luro – Bahía Blanca	Neuquén	Etapas de reconocimiento

de Argentina es superior a estos 18 primeros prospectos, el SEGEMAR continúa en la misión de identificar nuevos recursos geotérmicos en territorio nacional, y con ello incrementar la base de datos de información geocientífica aplicada a su caracterización.

En 2017 el Ministerio de Energía y Minería (MINEM) de la Nación expresó interés en el desarrollo de proyectos de energía geotérmica. El MIMEM destacó el potencial geotérmico y también se conformó la Cámara Geotérmica Argentina (CGA) con el fin de impulsar el sector. El potencial eléctrico-geotérmico de Argentina está sujeto a algunas incertidumbres, pero los valores dados en diferentes fuentes están dentro del mismo orden. Según Giorgio Stangalino, presidente de la CGA, el potencial a nivel nacional es de hasta 1.500 MW, lo que se enmarca en el rango de 490 MW a 2.010 MW antes mencionado. Sin embargo, cabe indicar que el límite superior se estima bajo el tema de aplicar únicamente tecnología de punta. Se estima que en la zona volcánica de Domuyo (provincia de Neuquén) hay una liberación de energía térmica de alrededor de 1.100 MW termal, lo que lo convertiría en un campo geotérmico muy importante en el mundo, comparable a los campos Mutnovsky en Rusia y Wairakei en Nueva Zelanda (Chiodini et al., 2014). Las provincias en las que existen proyectos geotérmicos en diferentes etapas de estudio son: Jujuy, Salta, Catamarca, San Juan, Tucumán, Santiago del Estero, Mendoza, Neuquén y Buenos Aires. De estos, se tienen cuatro proyectos geotérmicos que ya se encuentran en etapa de estudio avanzado con los siguientes resultados:

- Provincia Jujuy, volcán Tuzgle, capacidad estimada de 20 a 30 MW.

- Provincia Neuquén, volcán Copahue, capacidad confirmada 30 MW.
- Provincia de Salta, proyecto geotérmico Tocomar, capacidad estimada de 20 a 30 MW.
- Provincia San Juan, proyecto geotérmico Despoblados, capacidad estimada de 15 a 20 MW.

A pesar de estas perspectivas positivas, se ha avanzado poco en los últimos años como muestra el ejemplo de Copahue, donde la primera planta de energía geotérmica fue un proyecto piloto de 670 kWe. Las perforaciones se realizaron en las décadas de 1970 y 1980, conteniendo cuatro pozos entre 954 m a 1.414 m de profundidad y temperaturas en un rango de 220 a 250 °C. Independientemente de los resultados prometedores y las buenas condiciones logísticas, la planta solo operó, como se dijo, entre 1988 y 1997. Los intentos del gobierno de Neuquén desde 2009 para promover y reactivar el proyecto hasta ahora no han tenido éxito.

En resumen, aunque Argentina tiene amplias y numerosas zonas con gran potencial geotérmico que podrían alimentar y diversificar la matriz energética, el aprovechamiento de esta energía para generación eléctrica continúa siendo nulo.

■ ARGENTINA, RESEÑA HISTÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN GEOTÉRMICA

Según Bona y Coviello (2016), Argentina es el país en América del Sur que más avance ha tenido en el sector geotérmico, llegando a producir electricidad mediante la planta geotérmica piloto de Copahue y desarrollando diferentes aplicaciones de uso directo del calor.

Argentina inició a interesarse en la posibilidad de utilizar sus recur-

sos geotérmicos para generar electricidad en los años 50, cuando el Gobierno Federal encargó la evaluación de algunas zonas termal del país a la firma italiana Larderello SpA. Copahue, en la Provincia del Neuquén, fue clasificado en ese entonces como el sitio más prometedor para el desarrollo de un recurso de alta entalpía. Sin embargo, las actividades no se iniciaron hasta veinte años después, a principios de los años 70.

En 1971, el Gobierno Argentino recibió el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para evaluar las perspectivas geotérmicas del país. Una misión llevada a cabo por expertos del PNUD reconfirmó en esa ocasión a Copahue como el sitio más promisorio para comenzar con la exploración geotérmica. Esto condujo a la creación, en 1974, de una entidad específica para la ejecución de investigaciones geotérmicas, denominada "Comisión Nacional de Estudios Geotérmicos", integrada por el Ministerio de Energía de la Nación, la empresa petrolera estatal YPF y el Gobierno Provincial de Neuquén. Dicha entidad llevó a cabo investigaciones geológicas y geoquímicas en las áreas de Copahue y Domuyo (ambos en la Provincia del Neuquén), y en 1976 perforó el primer pozo en Copahue (COP-I), el cual confirmó la existencia de un sistema geotérmico de alta temperatura. Luego, las actividades se estancaron por falta de fondos.

En 1979, el Gobierno Federal tomó nuevamente la iniciativa a través de la Secretaría Nacional de Energía y Planificación, que preparó un plan específico para el desarrollo de la energía geotérmica, denominado "Regionalización Geotérmica 1979", el cual recibió el apoyo de programas de cooperación internacional. Los objetivos del plan fueron

inicialmente planteados para ejecutar once estudios de reconocimiento y doce estudios de prefactibilidad en doce provincias del país, en el plazo 1980-1984. El logro de dichos objetivos fue sin embargo parcial, dado que se alcanzó el nivel de prefactibilidad solamente en las áreas geotérmicas de Copahue, Domuyo, en Neuquén y Tuzgle-Tocomar, Jujuy-Salta, mientras que los estudios de reconocimiento abarcaron solamente cinco provincias (Salta, Jujuy, Catamarca, La Rioja y San Juan). La cooperación italiana lideró el estudio de prefactibilidad de Copahue, y llevó a cabo el reconocimiento en el noroeste de Argentina, seguido por el estudio de prefactibilidad de la zona Tuzgle-Tocomar; mientras que la cooperación japonesa contribuyó con el estudio de prefactibilidad en la zona de Domuyo. Los resultados fueron particularmente interesantes para Copahue, donde un nuevo pozo (Copahue-I, perforado en 1981) descubrió un reservorio geotérmico con producción de vapor. En Tuzgle-Tocomar y en Domuyo fueron identificadas condiciones promisorias para la existencia de recursos geotérmicos de interés comercial.

En 1985, la creación del Centro Regional de Energía Geotérmica del Neuquén (CREGEN), con el apoyo de la Secretaría Nacional de Energía, en colaboración con el Gobierno Provincial del Neuquén y con la Universidad Nacional de Comahue, sobre la base de expertos que venían trabajando en la provincia, dinamizó ulteriormente el sector. El CREGEN concentró sus esfuerzos en el campo geotérmico de Copahue, donde perforó un pozo adicional e instaló una pequeña planta piloto de 0,67 MWe en 1988, que entregó electricidad a la red, mientras se completaba un estudio de factibilidad con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional de Ja-

pón (JICA). El CREGEN también llevó a cabo actividades en Domuyo, donde instaló en 1987 un sistema de calefacción geotérmica para las instalaciones turísticas. La tarea del CREGEN no fue sin embargo limitada a Neuquén, sino que proporcionó asistencia técnica a otras provincias, realizando estudios hidrogeológicos y geoquímicos complementarios en Tuzgle-Tocomar (Jujuy y Salta, 1988), estudios de reconocimiento en el área de Famatina (La Rioja y Catamarca, 1987) y en el área de Río Hondo-Taco Ralo (Tucumán y Santiago del Estero, 1987-1988). Desafortunadamente, el CREGEN operó solamente hasta 1990, cuando la Secretaría Nacional de Energía suspendió la provisión de fondos a los centros regionales.

A principios de los años 90, el débil apoyo institucional y los bajos costos de la energía generada por recursos hidroeléctricos y combustibles fósiles, paralizaron las actividades geotérmicas en Argentina y lamentablemente el grupo de expertos que estaba en CREGEN se dispersó. A partir de ese momento no hubo significativo progreso en el sector de la energía geotérmica para la generación de electricidad. Solamente el SEGEMAR ha mantenido cierta actividad con la compilación de catálogos de manifestaciones termales (Miranda y Pesce, 2000; Pesce y Miranda, 2003) y apoyando la investigación de proyectos de baja entalpía para aplicaciones directas, donde se ha logrado un progreso significativo.

En los últimos años la situación mostró algunas señales de cambio, con el surgimiento de iniciativas dirigidas a reactivar el sector geotérmico para generación de electricidad. Algunos gobiernos provinciales (Neuquén, San Juan, Mendoza, Jujuy, Salta) están intentando promover la participación de empresas privadas en el desarrollo de proyectos

geotérmicos mediante la aplicación de mecanismos concesionales o la creación de empresas mixtas público-privadas.

■ MARCO LEGAL DE LA GEOTERMIA EN ARGENTINA

Argentina no tiene instrumentos legislativos específicos para la exploración y explotación del recurso geotérmico, pero la actividad geotérmica está contemplada en el Código de Minería, y regulada también por los Códigos de Agua provinciales (Bona y Coviello, 2016).

En el Código de Minería, el recurso geotérmico es definido como "vapor endógeno", y considerado parte de una categoría de minas. Las concesiones de recursos geotérmicos están sujetas a las mismas reglas establecidas para las operaciones mineras, acoplando la explotación de fluidos calientes subterráneos con la extracción de minerales.

El Código de Aguas es un instrumento jurídico emitido a nivel provincial y varía de una provincia a otra. Se basa en el concepto legal de que el agua es de dominio público, propiedad de la provincia, así que el derecho de su uso requiere una concesión expedida por el Departamento Provincial de Aguas. La obtención de concesiones de agua implica una serie de procedimientos administrativos concebidos para actividades y condiciones típicamente asociadas con la exploración y explotación de recursos hídricos.

Este marco normativo, cuando se aplica a la energía geotérmica resulta débil y algo complejo, por lo cual ya surgieron algunas iniciativas que tratan de mejorar la situación; entre ellas una propuesta de modificación y aclaración del término "vapor endógeno" en el Código de Minería (Cámara de Diputados de la Nación,

2006), y un proyecto de Ley Geotérmica (BNamericas, 2010), pero sin llegar a resultados concretos hasta la fecha.

El marco legal de las energías renovables, incluyendo a la geotermia, como se dijo, está definido por la Ley 26.190 de 2006, modificada en 2015 por la Ley 27.191, la cual establece la política nacional de promoción del uso de fuentes renovables. Dicha ley declara de interés nacional la generación de electricidad con fuentes renovables para la prestación de servicio público, así como la investigación para el desarrollo tecnológico y fabricación de equipos para este fin. Los incentivos establecidos en la ley incluyen la conformación de un fondo fiduciario (FODER) para respaldar la financiación de los proyectos de inversión, beneficios fiscales y un sistema de subasta para la contratación de energía renovable.

■ TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA DE LA INDUSTRIA PETROLERA (O&G) A LA GEOTERMIA

El aprovechamiento de la energía geotérmica se enfrenta a muchos de los retos que se plantean en la exploración y producción de petróleo y gas, además de los problemas de aceptación social e impacto ambiental. Las perforaciones profundas son necesarias para alcanzar temperaturas suficientemente altas para recuperar con éxito la energía geotérmica no convencional. Existen tecnologías en desarrollo como los sistemas geotérmicos mejorados (*EGS, enhanced geothermal systems*) que utilizan técnicas de fracturamiento hidráulico y los sistemas geotérmicos avanzados que proponen el intercambio de calor con el fluido en un circuito cerrado mediante la perforación de uno o más pozos en la roca caliente

(*AGS, advanced geothermal systems*). El reto de la explotación geotérmica profunda es comparable al que plantean los proyectos de petróleo y gas de alta temperatura y presión. El acceso a estos objetivos profundos y la necesidad de completar los pozos de forma adecuada hacen que los operadores incurran en mayores costos de capital y de explotación.

Los temas relevantes en los campos de la ingeniería geotérmica y la ingeniería petrolera no son tan diferentes, ya que las habilidades de geociencias, perforación y terminación, ingeniería de reservorio y producción son necesarias para ambos, particularmente para aplicaciones de alta temperatura (Falcone et al., 2015). Por lo tanto, correspondería a la industria energética aprovechar la sinergia entre estos dos sectores e impulsar la transferencia de tecnología (Falcone y Teodoriu, 2008).

La transferencia de tecnología del sector del petróleo y el gas al sector de la geotermia no es nueva, pero quizás no ha sido tan eficiente como habría de esperar. Esto se ha debido principalmente a las diferencias económicas entre los proyectos geotérmicos y los de hidrocarburos, con un periodo más largo de deuda antes de la recuperación de los costos para la explotación geotérmica. Por ejemplo, en EE.UU. se perforan menos de 100 pozos geotérmicos al año (la mayoría de menos de 2.800 m), frente a los miles de pozos de petróleo y gas que se perforan cada año (Falcone et al., 2015).

A continuación, se citan las condiciones de mercado desfavorables para la explotación geotérmica.

- La industria geotérmica es pequeña y descapitalizada. No hay subsidios, ni financiación, ni políticas de incentivo en la mayoría de los países por lo que

no es del interés de muchos inversores.

- Los costos de inversión inicial son elevados asociados a altos costos de exploración y elevado riesgo al no conocerse de forma adecuada las características geológicas y de fluidos de los sistemas geotérmicos de la zona.
- La ubicación geográfica de los recursos se asocia a sistemas tectónicos activos, generalmente alejados de los centros de uso.
- Los bajos precios de otras fuentes de origen renovable como la energía solar y eólica que compiten con el desarrollo geotérmico. También, en ocasiones, precios de combustibles fósiles bajos.
- Baja transferencia tecnológica de la industria petrolera a la geotermia.
- En contraste, se pueden citar las siguientes condiciones favorables de mercado para el aprovechamiento de recursos geotérmicos.
- Si bien los costos iniciales son elevados, una vez que la central entra en operación el precio de la energía es muy competitivo, aporta electricidad de carga base y con elevados factores de capacidad, inclusive mayor al 90 %. Además, se debe considerar que la exploración de nuevas áreas petroleras implica también elevados costos.
- Las centrales geotérmicas tienen vida útil prolongada, inclusive hoy en día algunas llevan más de 30 años operando sin inconvenientes.
- El desarrollo de campos geotérmicos para generación de electricidad puede ser más competitivo que el desarrollo de proyectos energéticos asociados a combustibles fósiles en función del precio del barril de

petróleo. Inclusive, el conocimiento geotérmico del país se inició hace varias décadas liderado por YPF en busca de alternativas energéticas por la crisis del petróleo de los años 70.

- Las tecnologías de exploración, perforación, reservorios, producción y el personal calificado son muy similares a la industria petrolera. Esto significa que no se necesita de tecnologías nuevas ni formación de profesionales ya que dicha industria dispone de todo esto.
- Las tecnologías avanzadas de explotación de yacimientos no convencionales actualmente en el país, como el fracturamiento hidráulico y perforación horizontal en condiciones de alta presión y temperatura, pueden aplicarse al desarrollo de sistemas geotérmicos mejorados (EGS), sistemas de roca seca-caliente (HDR), sistemas geotérmicos avanzados (AGS) y sistemas de roca super caliente.
- La utilización de “*data science*”^(b), “*machine learning*”^(c) e inteligencia artificial para el modelado de reservorios geotérmicos para un mejor entendimiento

del sistema y las interacciones: roca – fluido – calor – pozo.

■ CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS GEOTÉRMICOS

Si bien existen analogías entre la industria petrolera y la geotérmica, la perforación y terminación de pozos geotérmicos tienen algunas particularidades. Los reservorios hidrotermales pueden estar conformados además de rocas sedimentarias, de rocas ígneas y/o metamórficas que son más duras y abrasivas que rocas sedimentarias donde generalmente se encuentra petróleo y gas. Esto implica un mayor desgaste en los trépanos de perforación, requiriendo de materiales más duros resistentes a la corrosión como lo son los trépanos de tipo PDC que tienen insertos de carburo de tungsteno o de diamante para aumentar su dureza y la vida útil del trépano.

Otra característica fundamental de los pozos geotérmicos son las condiciones de alta presión y temperatura donde se encuentra el recurso, aunque estas en un principio, no serían limitaciones ya que existen pozos y en especial en la explota-

ción de recursos no convencionales de petróleo y gas, que requieren de perforaciones profundas en condiciones de alta presión y temperatura. Se puede decir que las tecnologías actuales, y en especial en Argentina por su nivel de explotación no convencional en Vaca Muerta, son aplicables, con sus particularidades, a la perforación y terminación de pozos geotérmicos.

Para generación eléctrica se necesita elevados caudales de fluido (vapor o agua) a alta temperatura, por lo que la terminación de pozos geotérmicos requiere de diámetros de cañerías o *casing* más grandes, aumentando el costo de esta tarea. Además, las cañerías o *liners* de producción son del tipo ranurado con el agregado de grava en el espacio anular entre reservorio y cañería de producción, similar a la terminación que se utiliza en pozos de agua subterránea. Se diferencia de las cañerías de producción de petróleo ya que son caños sin costura, cementados por su espacio anular con la formación y luego punzados o perforados para la conexión del reservorio con el pozo. La Figura 7 muestra esquemáticamente la terminación de

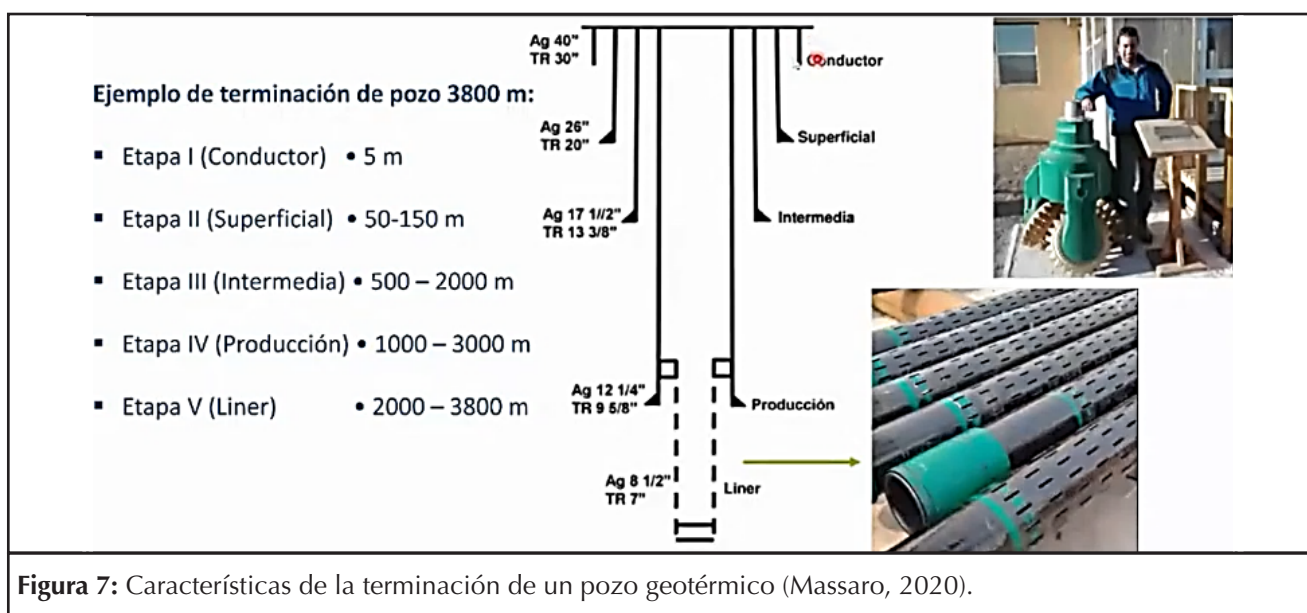


Figura 7: Características de la terminación de un pozo geotérmico (Massaro, 2020).

Tabla 3: Comparación de las características de un pozo petrolero con un pozo geotérmico (Massaro, 2020). ** Precio del barril de petróleo WTI el 19/12/2022.

Pozo de petróleo	Característica	Pozo geotérmico
150 – 175 °C (se considera de alta T) (300 – 350 °F)	Temperatura	150 a más de 350 °C (300 a + 650 °F)
5000 bpd (se considera un caudal alto) (150 gal/min)	Caudales	50000 bpd es el promedio, 10x más (15000 gal/min)
Vertical y largo alcance horizontal Onshore y Offshore – 5 a 7" CSG Prod	Perforación	Vertical, desviado horizontal Onshore – 8 a 12" CSG Prod (ranurado)
Alto flujo inicial (meses) Declinación de producción (años)	Perfil de producción	Producción constante 20-30+ años
Rocas sedimentarias	Litología	Rocas sedimentarias, ígneas, metamórficas
Estratigráficas - Estructural	Facies	Sistemas fallados complejos
Petróleo y/o gas 75,05 USD/bbl**	Valor de producto producido	Calor: agua caliente, vapor 0,25 USD/bbl

un pozo geotérmico, que salvo por los diámetros mayores y la cañería de producción ranurada, es similar a la terminación de un pozo petrolero.

La Tabla 3 muestra las diferencias en la terminación de un pozo petrolero con un pozo geotérmico. Se observa que los caudales de producción de este último son en general 10 veces más que los caudales de producción del primero, por esto, para la correcta operación de estos caudales se requiere de mayores diámetros y una cañería de producción ranurada.

El recurso geotérmico se encuentra en rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, en condiciones de alta temperatura. Las rocas ígneas y metamórficas son más duras (resistencia a la compresión de más de 240 MPa ^(d)) y abrasivas (contenido de cuarzo mayor al 50 %) que las rocas sedimentarias por lo que se acorta la vida útil de los trépanos. Además, debido a la tectónica energética del ambiente, las formaciones se encuentran muy fracturadas con

estructuras de doble permeabilidad (matriz-fractura) y poco presionadas con los riesgos asociados de pérdida de circulación cuando se perfora.

Los pozos geotérmicos requieren de más operaciones de terminación y reparación (*workover*), ya que pueden producir salmueras altamente corrosivas y con elevada carga de sólidos disueltos (hasta más de 250.000 TDS ^(e)), y gases corrosivos como CO₂ y H₂S (disuelto o libre), además del frecuente depósito de sales en cañerías (*scaling*). A diferencia de los reservorios estratigráficos de hidrocarburos, los sistemas geotérmicos se conforman de estructuras falladas y complejas, lo que genera gran variabilidad de los pozos en un mismo yacimiento geotérmico.

■ RECURSOS COPRODUCIDOS Y APROVECHAMIENTO DE POZOS PETROLEROS ABANDONADOS

Según Massaro (2017) existe una amplia disponibilidad de instalaciones en los yacimientos de petróleo

y gas de las cuencas petroleras de la Argentina con producción marginal que pueden ser utilizadas para el aprovechamiento de la energía geotermal (ver Figura 8) en climatización, piscicultura, viveros, procesos industriales y en operaciones propias de la producción de hidrocarburos (recursos de baja entalpía), hasta incluso, si se dispone de energía térmica de moderada entalpía podría producirse electricidad en una planta de ciclo binario (Figura 9). El desafío se encuentra en la toma de decisiones sobre dichos activos para incluir la energía geotérmica en el desarrollo de los proyectos.

En la Argentina, existe una acelerada caída en la producción de hidrocarburos debido en parte a la falta de inversión y a que muchos de los yacimientos de petróleo y gas se encuentran en etapa avanzada de madurez. Otro factor se debe a que las inversiones de los últimos 10 años de esta industria se han centrado en la explotación de recursos no convencionales en la cuenca Neuquina para la extracción de gas de

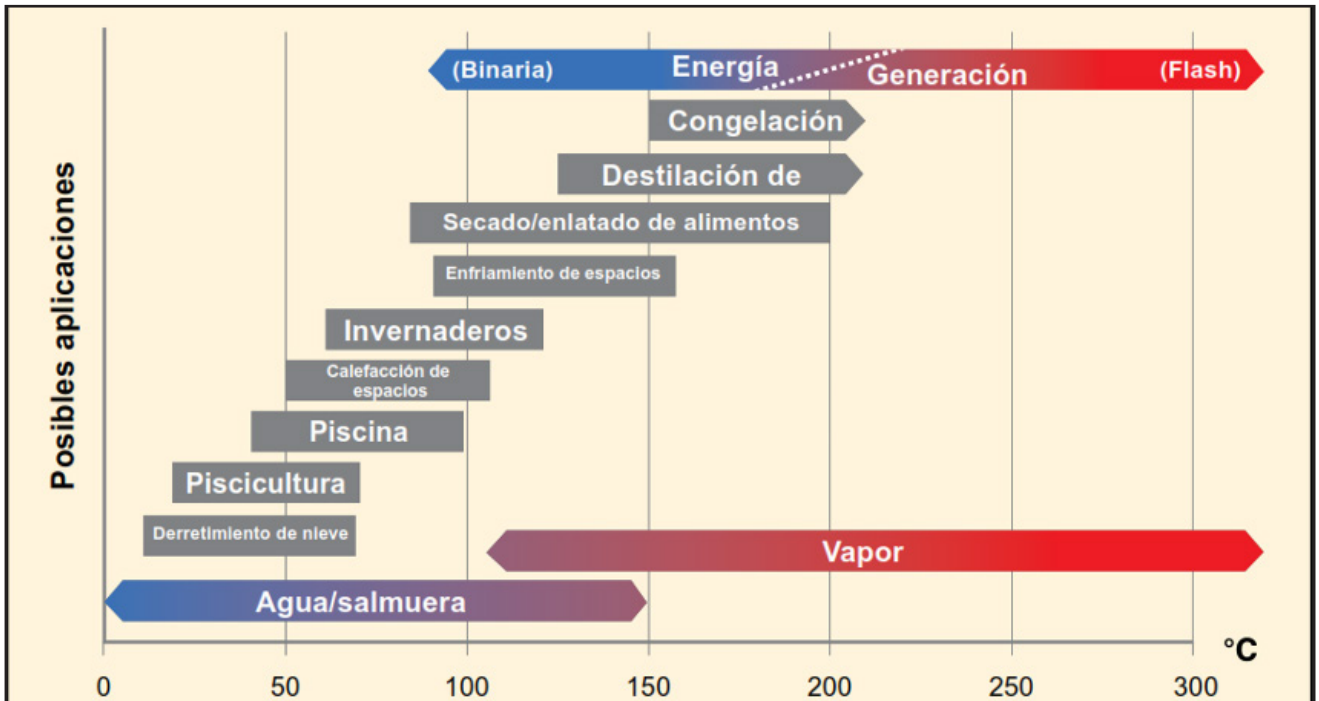


Figura 8: Diagrama Lindal para distintas aplicaciones del recurso geotérmico (ESMAP, 2012).

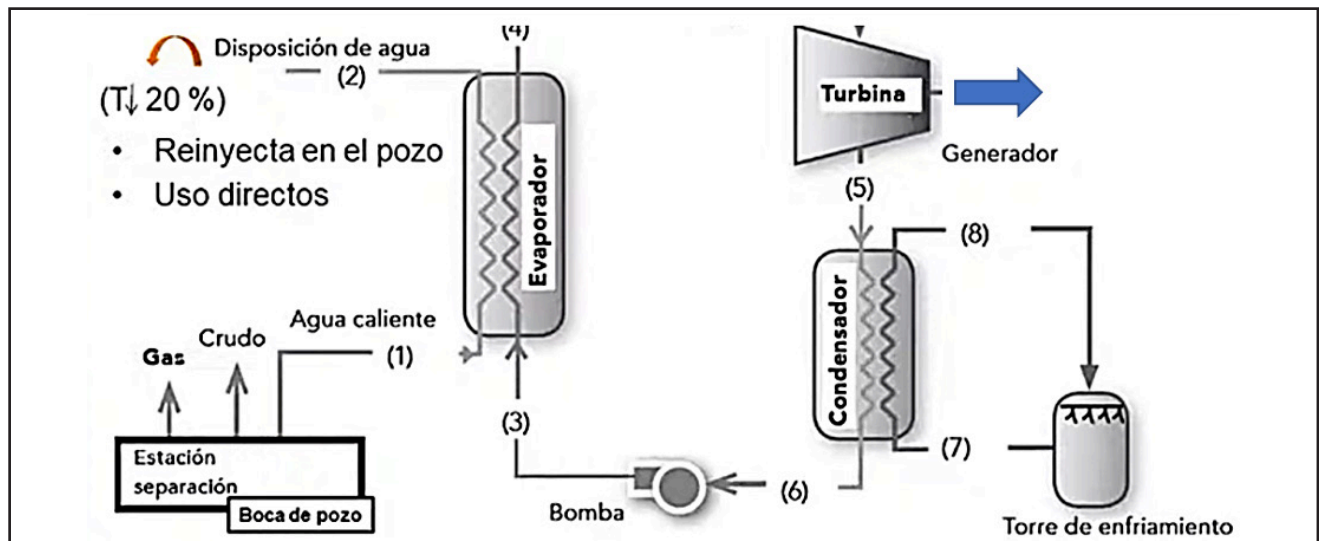


Figura 9: Esquema de operación de un ciclo binario Rankine para el aprovechamiento de recursos coproducidos de la industria petrolera. Es modular y transportable (Barredo, 2020).

esquistos (*shale gas*), petróleo de esquistos (*shale oil*) y gas de arenas compactas (*tight gas*) de la conocida formación Vaca Muerta.

Entonces, los yacimientos del sector convencional de la cuenca

Neuquina, del Golfo de San Jorge, Austral, Cuyana y del Noroeste están muy cerca de su madurez y en la mayoría de los casos con producción marginal. Por ejemplo, algunos yacimientos petroleros de la cuenca del Golfo de San Jorge tienen hasta

un corte de producción del 98 %, esto quiere decir que solo el 2 % de lo que se produce son hidrocarburos y el 98 % restante es agua caliente. En función de la profundidad de los pozos y del gradiente geotérmico, se podría utilizar el contenido

energético del agua coproducida de la extracción de petróleo y gas en distintas aplicaciones, por ejemplo, en intercambiadores de calor para distintos procesos industriales, en calefacción de edificaciones (*district heating*), hasta incluso generación de electricidad en un ciclo binario Rankine. Como puede observarse es un recurso energético que no se aprovecha y podría utilizarse en varias aplicaciones como lo indica el diagrama Lindal en la Figura 8.

La Figura 10 muestra la temperatura en función de la profundidad de más de 1.200 pozos de la Cuenca del Golfo de San Jorge con un corte de agua mayor al 90 %, mostrando rangos de temperatura de 80 a 115 °C en profundidades aproximadas de 2.350 m, con un gradiente geotérmico promedio de 3,59 °C/100 m. Estas condiciones son favorables para el aprovechamiento del calor coproducido siendo susceptible de ser transformado en energía eléctrica en un ciclo binario (Figura 9) y utilizarla en operaciones dentro del mismo yacimiento o aprovecharlo de forma directa. Como se observa, la reducción de temperatura del agua luego de generar electricidad es de un 20 %. Esta agua puede reinyectarse en el yacimiento o seguir aprovechando su contenido energético en usos directos (Stinco, 2015).

Para generar una potencia eléctrica continua de 1 kW se requieren 16 bbl⁶/d de agua con suficiente temperatura para el ciclo binario Rankine. Un pozo tipo de la Cuenca del Golfo de San Jorge del Flanco Sur en el periodo 2010-2011 producía 120 bbl/d de petróleo y 280 bbl/d de agua, por lo que potencialmente se podrían generar 420 kWh por día.

Los yacimientos de esta área se conforman por 2.150 pozos productivos con una producción de agua de 340.000 bbl/d por lo que se podría producir 510 MWh por día de

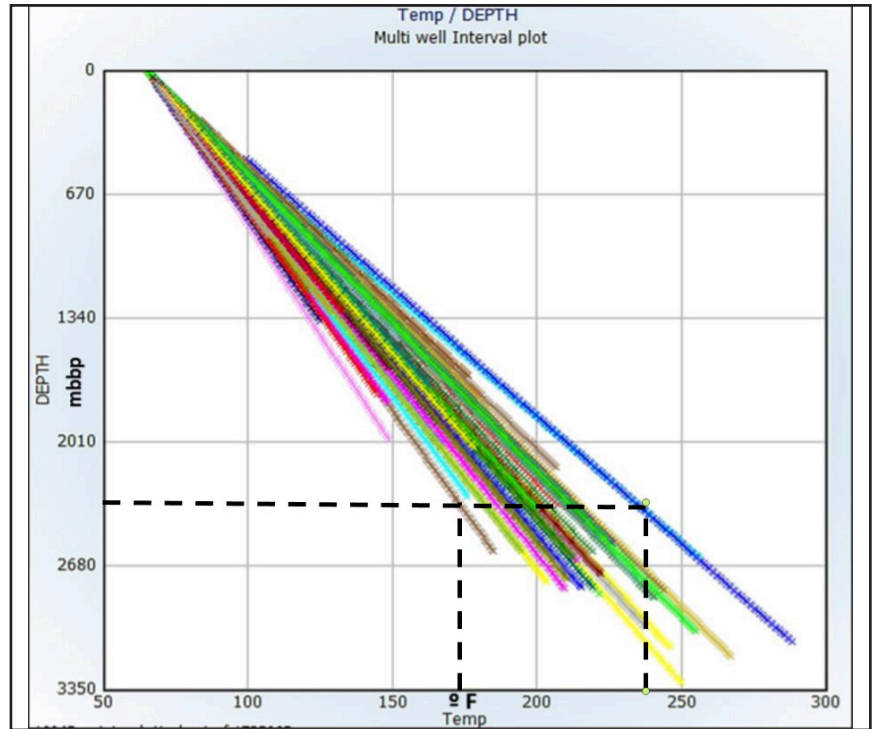


Figura 10: Temperatura en función de la profundidad de pozos de la Cuenca del Golfo de San Jorge, se observa que a una profundidad aproximada de 2350 m la temperatura de los pozos tiene un rango de 80 a 115 °C (Stinco, 2015).

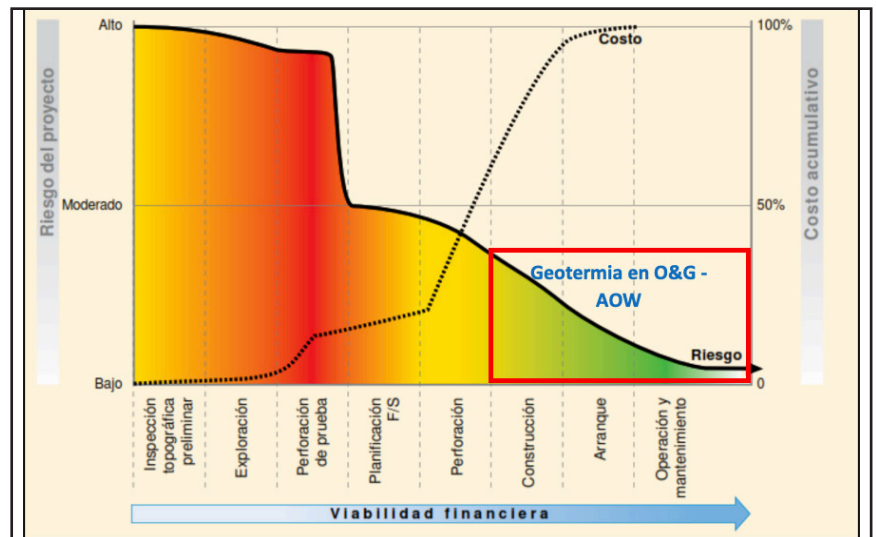


Figura 11: Costo y perfil de riesgos en las diversas fases de un proyecto geotérmico. Para el caso particular de aprovechamiento de pozos de petróleo abandonados (AOW), se observa que tanto el riesgo como el costo se reducen significativamente, al igual que el tiempo del proyecto (modificado de ESMAP, 2012).

electricidad solo con el aprovechamiento del calor del agua coproducida de los pozos.

Como se observa el potencial energético de pozos petroleros con producción de hidrocarburos margi-

nal y pozos abandonados tienen un gran potencial de aprovechamiento energético, ya sea para producir electricidad en un ciclo binario Rankine si la temperatura del agua es suficiente, para uso directo en climatización o distintos procesos industriales.

La Figura 11 muestra la evolución financiera de un proyecto geotérmico a través del riesgo del proyecto, los costos acumulados y las fases de desarrollo. En general, un proyecto geotérmico dura de 5 a 10 años hasta su puesta en marcha. Debido a este largo ciclo, la energía geotérmica no es una solución rápida para los problemas de suministro de cualquier país, sino más bien debería ser parte de una estrategia de generación de largo plazo.

Además de los riesgos comunes a un proyecto de generación de energía conectada a la red eléctrica, los proyectos geotérmicos tienen riesgos adicionales en las fases de exploración, perforación, producción (*upstream*) y, especialmente, perforación.

En cambio, los riesgos y tiempos de ejecución de un proyecto geotérmico pueden reducirse considerablemente si se utilizan recursos coproducidos de la industria petrolera (O&G), como por ejemplo pozos de petróleo abandonados (AOW), disminuyendo los costos hasta un 70 % (ver recuadro rojo en la Figura 11).

■ CONCLUSIONES

- El aprovechamiento de los recursos geotérmicos, en todas sus formas, desde el uso directo, bombas de calor hasta la generación eléctrica debería considerarse con mayor ímpetu para la diversificación de la matriz energética del país, para disminuir el uso de combustibles fósiles y aportar a la lucha contra

el cambio climático por reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

- Argentina tienen gran disponibilidad de recursos geotérmicos de baja, media y alta entalpía; sin embargo, para fines de generación de electricidad, el aprovechamiento es nulo. Además, el país fue uno de los pioneros en Sudamérica en generación de electricidad geotérmica con la central piloto de Copahue. Se tiene la experiencia y los recursos necesarios para el despliegue de esta tecnología.
- Si bien los costos iniciales de un proyecto geotérmico son elevados, las incertidumbres y riesgos se reducen significativamente con el conocimiento integral de la geología y propiedades del subsuelo. Por tal motivo, resulta fundamental continuar con la investigación y el estudio de los recursos geotérmicos, como así también disponer de todos los datos e información geológica y de subsuelo disponibles.
- Las tecnologías avanzadas de perforaciones profundas y fracturamiento hidráulico para el desarrollo de recursos geotérmicos no convencionales son análogas a las utilizadas en la explotación de yacimientos no convencionales de petróleo y gas. Argentina, con el desarrollo masivo de Vaca Muerta dispone de tecnologías y el "know how" necesario para la sinergia entre la industria O&G y la producción de energía geotérmica.
- Existe un enorme potencial de aprovechamiento de los recursos coproducidos de la industria petrolera, desde el uso directo hasta la generación de energía con aplicaciones directas en el mismo yacimiento, o en distintos procesos que requieran de energía.
- Resulta necesario contar con políticas de estado contundentes que trasciendan los gobiernos de turno y que incluyan a la energía geotérmica en la agenda nacional de desarrollo energético procurando una estrecha y dinámica interrelación

entre el estado, las universidades, los centros de investigación, las empresas privadas y los organismos de financiamiento.

■ BIBLIOGRAFÍA

Barcelona, H. (2015). "Caracterización del Sistema Geotermal de Valle del Cura, San Juan". Tesis Doctoral en el área de Ciencias Geológicas. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas.

Barcelona, H. (2020). "Ciclo de Conferencias Virtuales de la Universidad de Buenos Aires (UBA): Jornadas Exactas y la Energía. Energía Geotérmica." presentada por el Dr. Hernán Barcelona el 16/10/2020.

Barredo, S. (2020). "Ciclo de Conferencias Virtuales UBA: Jornadas Exactas y la Energía. Energía Geotérmica." presentada por Dra. Silvia Barredo el 16/10/2020.

Boden, D. R. (2017). "Geological Fundamentals of Geothermal Energy". Energy and The Environment, Abbas Ghassemi, Series Editor, Boca Raton, FL: CRC Press.

Bona, P., Coviello, M. F. (2016). "Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur". Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Naciones Unidas.

Coira, B. (2008). "Recursos Geotérmicos de Alta Entalpía de la Provincia de Jujuy". Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET). Instituto de Geología y Minería, Universidad Nacional de Jujuy.

- Chiodi, A. L., Filipovich, R. E., Esteban, C. L., Pesce, A. H., Stefanini, V. A. (2020).** "Geothermal Country Update of Argentina: 2015-2020". Proceedings World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, April 26 – May 2, 2020.
- Chiodini, G., Liccioli, C., Vaselli, O., Calabrese, S., Tassi, F., Caliro, S., Caselli, A., Agosto, M., D'Alessandro, A., 2014.** "The Domuyo Volcanic System: An Enormous Geothermal Resource in Argentina Patagonia". Journal of Volcanology and Geothermal Research 274 (2014) 71-77.
- Giordano, G., Ahumada, M. F., Aldega, L., Baez, W., Becchio, R., Bigi, S., Caricchi, C., Chiodi, A., Corrado, S., De Benedetti, A. A., Favetto, A., Filipovich, R., Fusari, A., Gropelli, G., Invernizzi, C., Maffucci, R., Norini, G., Pinton, A., Pomposiello, C., Tassi, F., Taviani, S., Viramonte, J. (2016).** "Preliminary Data on the Structure and Potential of the Tocomar Geothermal Field (Puna Plateau, Argentina). Energy Procedia 97 (2016) 202 – 209.
- Gonzalez, M. (2019).** "Energía Geotérmica: Estado de Arte de la Tecnología de Generación de Energía Eléctrica a partir de la Geotermia".
- IRENA 2021a- IRENA (International Renewable Energy Agency) (2021a).** "Renewable Capacity Statistics 2021".
- IRENA 2121b- IRENA (International Renewable Energy Agency) (2021b).** "World Energy Transitions Outlook 2021".
- IRENA 2021c- IRENA (International Renewable Energy Agency) (2021c)** "Renewable Power Generation Costs in 2020".
- IRENA 2017- IRENA (International Renewable Energy Agency) (2017).** "Geothermal Power Technology Brief".
- Ley 1998- Ley N° 25.019 (Septiembre 1998).** "Régimen Nacional de Energía Eólica y Solar".
- Ley 2006-Ley N° 26.190 (Diciembre 2006).** "Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinadas a la producción de energía eléctrica".
- Ley 2015-Ley N° 27.191 (Septiembre 2015).** "Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinadas a la producción de energía eléctrica", modifica Ley N° 26.190.
- Massaro, E. (2017).** "Finite Element Simulation of a Highly Water-Saturated Gas Reservoir in Northwestern Argentina to Forecast its Geothermal Potential". Thesis Work, Institute of Applied Geosciences Department of Civil Engineering, Geo and Environmental Sciences Karlsruhe Institute of Technology, Germany.
- Massaro, A. (2020).** Ciclo de conferencia virtuales de la Facultad de Ingeniería del Ejército (FIE): "Del Fracking a la Geotermia – La Energía de Transición" presentada por el Dr. Agustín Sosa Massaro el 22/10/2020.
- Pesce, A. y Miranda, F. (2003).** SEGEMAR 2003- Servicio Geológico Minero Argentino (2003). "Catálogo de Manifestaciones Termiales de la República Argentina, Volumen I, Región Noroeste".
- Pesce, A. y Miranda, F. (2000).** SEGEMAR 2000. Servicio Geológico Minero Argentino (2000). "Catálogo de Manifestaciones Termiales de la República Argentina, Volumen II, Región Noreste, Centro y Sur".
- Programa Renovar:** "https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/renovables/renovar".
- Naón, V. (2020).** SEGEMAR 2020- Servicio Geológico Minero Argentino (2020). "Catálogo de Publicaciones Geocientíficas sobre 18 Prospectos Geotérmicos Seleccionados por el Servicio Geológico Minero Argentino".
- Shere, J. (2013).** "Renewable: The World-Changing Power of Alternative Energy". St Martin's Press: New York, p. 201.
- Stínco, L. P. (2015).** "Caracterización y análisis evolutivo en subsuelo de los sistemas petroleros representados por las unidades cretácicas comprendidas entre los 46° y 47° latitud Sur y 67° y 69° longitud Oeste, Flanco Sur de la Cuenca Golfo San Jorge, República Argentina". Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Van der Zwaan y Longa 2019-van der Zwaan, B., Longa, F. D. (2019).** "Integrated assessment projections for global geothermal energy use". Geothermics 82 (2019) 203-211.

■ NOTAS

- ^(a) Presión litoestática: es la presión del peso de sobrecarga o de la roca suprayacente (rocas que están por encima) que es soportado

por una formación geológica en profundidad, también se conoce como presión geoestática.

^(b) Data science: expresión en inglés referida a la “ciencia de datos”. Es un campo interdisciplinario de la inteligencia artificial que involucra estadísticas, método científico, análisis predictivo y automático, visualización y análisis para lograr un mejor entendimiento de los datos.

^(c) Machine learning: expresión en inglés referida al “aprendizaje automático”. Es un campo de la inteligencia artificial, que, a través de

distintos algoritmos, le da capacidad a las computadoras de identificar patrones en datos masivos y elaborar predicciones (análisis predictivos).

^(d) MPa: múltiplo de unidad de medición de presión, M = mega ($10^6 = 1.000.000$), Pa = pascal. Es decir, 1 MPa es igual a 1.000.000 de pascales.

^(e) TDS: “Total Dissolved Solids” o sólidos disueltos totales, es una medida de concentración total de todas las sustancias disueltas en un líquido.

^(f) bbl/d: medida de caudal volumétrico utilizada comúnmente en la industria petrolera; bbl = barril, día = día, L = litro (1 bbl/d = 158,99 L/d).

1. La primera planta geotérmica entró en operación en el año 1913 en la localidad de Larderello, Italia. Inclusive el primer pozo que se perforó, no fue para extraer petróleo, sino para producir vapor.