

ENERGÍA GEOTÉRMICA: POTENCIALES APLICACIONES PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE LA MATRIZ ENERGÉTICA DE URUGUAY

GEOTHERMAL ENERGY: POTENTIAL APPLICATIONS TO DIVERSIFY THE ENERGY MATRIX OF URUGUAY

Cernuschi, F.

College of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, Oregon State University, 104
CEOAS Administration Building, Corvallis, OR, EE. UU.

federico.cernuschi@gmail.com

RESUMEN

La energía geotérmica es una promisoría fuente energética renovable por su baja a nula emisión de CO₂ y por la estabilidad de la producción.

En Uruguay, gradientes geotérmicos elevados relacionados a magmatismo están extintos desde el Cretácico, limitando así el potencial geotérmico. De todas maneras en el Noroeste, el gradiente geotérmico promedio estimado en -28.6 °C/km está relacionado al aislamiento térmico producido por basaltos Cretácicos que confinan acuíferos en rocas sedimentarias Carboníferas a Jurásicas en la Cuenca Paraná. Allí existen posibilidades de aprovechar la energía geotérmica:

1) Las aguas templadas y sobrepresurizadas del Sistema Acuífero Guaraní (-45 °C, >1000 m), además del uso recreativo actual posibilitarían la calefacción doméstica o industrial (invernaderos) reduciendo el consumo de otras fuentes de energía.

2) Las aguas de los posibles acuíferos Carbonífero-Permianicos infrayacentes, posiblemente sobrepresurizados (≤ 75 °C, ~2300 m) permitirían generar energía eléctrica utilizando plantas binarias enfriadas por agua superficial. De constatarse la existencia de estos u otras rocas sedimentarias a mayor profundidad (≤ 150 °C, ~4500 m), plantas binarias convencionales podrían impactar el consumo eléctrico nacional.

3) De ser viable, un sistema geotérmico mejorado en el basamento granítico a >5000 m de profundidad posibilitaría la generación de cantidades significativas de energía eléctrica con plantas binarias.

La implementación de estas tecnologías requiere de estudios detallados del gradiente geotérmico y la estratigrafía y geología estructural de la cuenca de Paraná así como el comportamiento de sus acuíferos y la localización de intrusiones graníticas en su basamento. Hasta el momento no estudiadas de manera sistemática y detallada.

Palabras claves: Energía geotérmica, Sistemas Geotérmicos Mejorados, Sistema Acuífero Guaraní, Energía en Uruguay, Cuenca de Paraná.

ABSTRACT

The geothermal energy is a promising renewable energy source due to the low to null CO₂ emissions and the stability of energy production.

In Uruguay, high geothermal gradients related to magmatism are extinct since the Cretaceous, limiting its geothermal potential. However, a moderate geothermal gradient in northwest Uruguay is estimated at an average of -28.6 °C/km. Here, thermally insulating Cretaceous flood basalts confine aquifers in Carboniferous to Jurassic sedimentary rocks of the Paraná basin. In this area geothermal applications are possible:

1) The over-pressurized, warm waters of the Guaraní Aquifer System (-45 °C, >1000 m), presently only used by the tourism industry, could be used for domestic or industrial heating (eg. greenhouses) to reduce the consumption of energy from other sources.

2) Waters from possibly deeper Carboniferous-Permian aquifers (≤ 75 °C, ~2300 m), may allow the generation of electricity using binary power plants cooled by superficial cold water. If these or other

sedimentary rocks extend deeper (≤ 150 °C, ~ 4500 m), conventional binary plants could contribute to the national energy demand.

3) If viable, creating an enhanced geothermal systems in the granitic basement, below 5000 m depth, could also enable the generation of significant amounts of electricity with binary plants.

To develop these scenarios, detailed research of the geothermal gradient and its variations at depths, the stratigraphy and structural geology of the Paraná basin, the hydrogeology of its aquifers and the localization of granitic intrusions on the basement are needed. All the above, have yet to be systematically and comprehensively studied.

Keywords: Geothermal energy, Enhanced Geothermal Systems, Guaraní Acuífero, Energy in Uruguay, Paraná basin.

INTRODUCCIÓN

La diversificación de la matriz energética, y más específicamente la incorporación de energías renovables, ha estado en la agenda política de casi todos los países que pueden afrontar inversiones de este tipo. Esta tendencia intenta minimizar las emisiones de gases invernaderos junto a otros impactos medioambientales durante la producción de energía, compensar las fluctuaciones en la producción al depender de una sola fuente, y minimizar los impactos económicos producidos por las variaciones en los precios de los hidrocarburos (UNCTAD, 2010). Uruguay no escapa a esta realidad, y en enero del 2014, la importación de molinos de viento para generación de energía eléctrica fue el segundo rubro de importación después del petróleo y gas (US\$ 95 millones, Uruguay XXI, n.d.).

Si bien el carbón y el petróleo se mantienen como una fuente fundamental de energía en el mundo, los impactos ambientales son diversos e importantes, siendo la emisión de CO₂ uno de los principales factores. El gas natural, si bien más limpio comparativamente, presenta impactos comparables (*i.e.* Patin, 1999). Las reservas mundiales de estas fuentes permanecerán siendo significativas tal vez por décadas, y continúan expandiéndose por el desarrollo y aplicación generalizada de nuevas técnicas como la perforación direccional profunda y la estimulación de reservorios (*fracking*). De todos modos, debido a los impactos medioambientales, los hidrocarburos están siendo considerados como un puente para habilitar y financiar el desarrollo de fuentes renovables y sustentables de modo de minimizar su utilización en el largo plazo.

Otras fuentes energéticas, anteriormente consideradas más benévolas con el medioambiente, como son las represas hidroeléctricas, han generado diversos impactos medioambientales. Desde la construcción de grandes lagos artificiales sobre suelos productivos o áreas vírgenes, hasta el impacto en la migración de peces e incluso generando posiblemente grandes emisiones de CH₄ (metano), un potente gas de efecto invernadero, desde los embalses (Beaulieu *et al.*, 2014). El gran tamaño de las nuevas represas hidroeléctricas diseñadas para generar suficiente energía para abastecer grandes poblaciones con estándares de vida moderno

ha causado enormes impactos medioambientales (ej. *Three Gorges* en China, Tullos, 2009).

Los parques de generación de energía eléctrica eólica que ocupan importantes superficies, no están libres de impactos ambientales y su construcción, igual que para construir paneles solares, requiere el consumo de grandes cantidades de metales y áridos que deben ser minados. Entre ellos cobre, aluminio, cemento, arena para vidrio, neodimio para super-electroimanes y otras tierras raras de usos diversos así como grandes cantidades de energía de fuentes convencionales, incrementando su costo ambiental (Olivier *et al.*, 2013). Las fluctuaciones en la producción, dependientes de los cambios en los regímenes del viento, requieren el uso conjunto de otras fuentes de energía o importantes inversiones en almacenamiento de energía en la red eléctrica. También, la vida útil relativamente corta de las turbinas, estimada en ~ 25 años, requiere nuevas e importantes inversiones y más materiales vírgenes para mantener los parques en producción (Staffell & Green, 2014).

Por otro lado, es posible que la energía nuclear sea una solución clave en el futuro de la humanidad, tanto a través de la generación de energía en reactores de fisión eficientes y seguros, como en el minimizado de desechos radioactivos en futuros reactores tipo *breeder* o en el caso que los reactores de fusión adquieran diseños aplicables a escala industrial. De todas maneras, recientes accidentes como el de Fukushima en Japón en el 2011 han influenciado en la opinión pública, desacelerando los avances en cualquier tipo de energía nuclear en el mundo (Ward *et al.*, 2012).

En este contexto, la energía geotérmica se posiciona como una fuente energética promisoría. Es posible tanto el aprovechamiento directo del calor para calefacción doméstica o industrial, minimizando el consumo de otras fuentes de energía, así como la generación de energía eléctrica con turbinas. Ambas alternativas poseen ventajas con respecto a otras fuentes renovables y ecológicas (*i.e.* Glassley, 2014): 1) excepto algunos casos no aplicables a los posibles escenarios de Uruguay, no emiten CO₂ ni otros gases de invernadero, 2) el agua subterránea puede ser utilizada en un circuito cerrado sin contaminarse, volviendo a ser reinyectada al acuífero luego de

aprovechar su calor, 3) los campos geotérmicos pueden ser explotados semi-sustentablemente por un largo período de tiempo con un bajo decrecimiento de temperatura de la fuente de energía, 4) las plantas de generación de energía eléctrica si bien requieren mantenimiento periódico, tienen una larga vida útil, en especial en comparación con los parques eólicos, y 5) la producción de energía es estable a lo largo del año y no varía con las estaciones o fenómenos climáticos.

En Uruguay, la energía eléctrica ha sido tradicionalmente producida por represas hidroeléctricas. Las variaciones en la cantidad y periodicidad de las lluvias en el Norte del país y Sur de Brasil, tal vez más extremas en las última décadas a raíz de cambios climáticos globales, producen variaciones en la estabilidad de la producción energética en particular durante los meses de verano y hacen necesaria la generación de energía eléctrica en plantas térmica activadas por petróleo (Olivet, 2014). Este hecho, junto al incremento del consumo doméstico en una población creciente y el mayor consumo industrial hacen necesaria la búsqueda de nuevas formas de energías para el país. Si bien los parques eólicos son un buen paso en esta dirección, no cubrirán la demanda por sí solos, y requerirán importantes nuevas inversiones al final de su vida útil.

otras fuentes de energía no emisoras (ej. Protocolo de Kyoto, UNFCCC, n.d.), actividades económicas-industriales que consuman CO_2 o emprendimientos de capturen y almacenen CO_2 (ej. inyección en el subsuelo). También es posible que regulaciones similares sean impuestas a las emisiones de otros gases invernaderos. El CH_4 producido mayoritariamente por las emisiones digestivas del ganado (Moss *et al.*, 2000) y el NO_2 , principalmente producido por la agricultura (EPA, n.d.), son significativos en Uruguay donde la agricultura y el uso de fertilizantes es elevado y es el país con mayor ganado per cápita (en otras palabras el emisor per cápita de metano de esta fuente, más alto). Por esto, Uruguay no solo deberá diversificar su matriz energética para asegurar su abastecimiento energético en el futuro, sino que deberá hacerlo con fuentes de bajas emisiones para minimizar el total de gases de invernadero producidas por otras actividades económicas, irremplazables en la economía del país, como ser la producción de alimentos.

Desde este punto de vista, la energía geotérmica podría ser una de las fuentes que aporten a la diversificación de la matriz energética. Si bien en Uruguay no se encuentran campos geotérmicos de alta entalpía y temperatura, típicamente asociados a

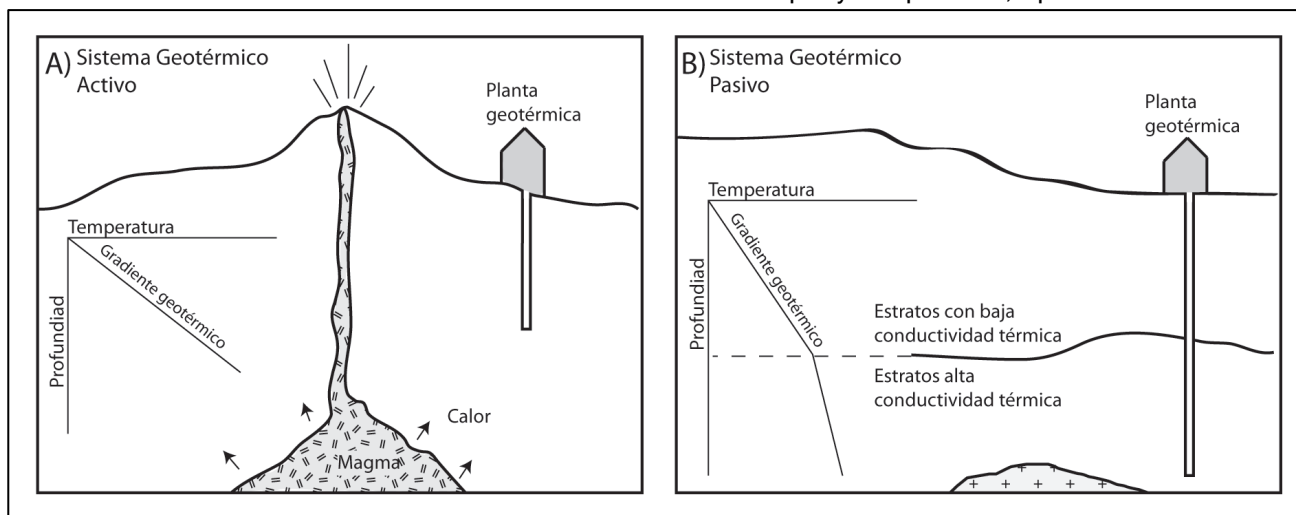


Figura 1: Esquema mostrando la relación entre el gradiente geotérmico y las fuentes geológicas de calor. **A)** El gradiente geotérmico es más alto en presencia de magma en las cercanías o en profundidad. **B)** El gradiente geotérmico es menos elevado cuando no hay fuentes magmáticas cercanas. Cuando la conductividad térmica de la roca es baja, el gradiente geotérmico es más elevado que en rocas con conductividad térmica alta. Si intrusivos graníticos antiguos están presentes el gradiente geotérmico será más elevado dado su producción de calor por decaimiento radioactivo.

Por otro lado, es posible que Uruguay se esté acercando al descubrimiento de petróleo y gas en yacimientos convencionales y no convencionales, tanto en el continente como en la plataforma marina (USGS, 2011; Ronda Uruguay III, n.d.). Si bien esto contribuirá a cubrir las necesidades energéticas, no contribuirá a disminuir las emisiones de gases de invernadero. Es posible especular que para cuando se descubran hidrocarburos y se inicie la producción, las emisiones de CO_2 estarán aún más controladas y reguladas, requiriendo el *offset* de las mismas con

magmatismo, en la Cuenca de Paraná en el noroeste del país existen gradientes geotérmicos relativamente elevados junto con acuíferos profundos y sobrepresurizados (Montaño & Peel, 2003). Estas condiciones posibilitan distintas alternativas para el aprovechamiento geotérmico para uso energético que merecen ser evaluadas (Cernuschi, 2013). Por otro lado, la exploración y posible futura explotación de hidrocarburos en el país, exige que equipamiento geofísico y maquinaria de perforación de gran envergadura, imprescindibles también para la

exploración geotérmica, estén disponibles en el territorio nacional. Esto hace que el país se encuentre en un buen período para afrontar la exploración geotérmica, ya que el traslado y contratación de este tipo de equipamientos es uno de los costos principales de su exploración. Muchas veces la inversión de trasladarlas y contratarlas sólo para este fin afecta la rentabilidad de pequeños proyectos geotérmicos.

Este artículo examina las distintas alternativas de aprovechamiento geotérmico para la generación de energía en la Cuenca de Paraná en el noroeste de Uruguay en base a la información geológica actual y tecnología disponible. Si bien hasta el momento no se han constatado temperaturas que permitan la generación de energía eléctrica, el conocimiento geológico actual de la Cuenca de Paraná junto con comparaciones geológicas con otras localidades en el mundo indican que es posible que existan las temperaturas necesarias en profundidad. Sin embargo, todavía hace falta explorar el recurso en conjunción con investigaciones de ciencia básica que contribuyan a entender la geología de la cuenca y su basamento, las variaciones del gradiente geotérmico en profundidad y la conductividad térmica de las rocas así como la permeabilidad de las rocas y existencia de acuíferos profundos.

El fin de este artículo es contribuir al comienzo de la evaluación de las diferentes alternativas y la consideración de planes energéticos que incluyan el estudio y desarrollo de generación de energía eléctrica con fuentes geotérmicas a corto, mediano y largo plazo.

ENERGÍA GEOTÉRMICA

Como energía geotérmica se define el calor almacenado en el interior del planeta Tierra que es creado por fuentes geológicas. Este calor a su vez es el motor último de diversos fenómenos geológicos como el magmatismo y tectónica de placas.

Por debajo de los primeros centímetros de suelo y roca —sensibles a las fluctuaciones de la temperatura atmosférica— la temperatura de la corteza terrestre

aumenta a medida que se incrementa la profundidad desde la superficie. Esto se debe al lento enfriamiento del manto y núcleo terrestre desde la acreción planetaria, combinado con el asilamiento térmico producido por la corteza terrestre (Stacey & Loper, 1988). Por otro lado, el decaimiento radioactivo de ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K también genera calor, y es particularmente importante en rocas con alto contenido de estos elementos, como son los granitos y algunas pelitas (Lubimova, 1968; Strivastava & Singh, 1998). Éstas son las fuentes de calor responsables del gradiente geotérmico en zonas de intraplaca o márgenes pasivos, lejos de magmatismo asociado a zonas de subducción, rifts, hot-spots o dorsales meso-oceánicas. Si bien el gradiente geotérmico de estas zonas varía enormemente en las primeras decenas de kilómetros dependiendo de si se encuentran rocas graníticas, pelitas, acuíferos que habiliten la convección del calor y rocas que actúen de aislantes, es esperable un rango estimativo de entre 12 y 35 °C/Km (McKenzie *et al.*, 2005, Pollack *et al.*, 1993). A los efectos de este artículo, los sistemas geotérmicos de este tipo, pertinentes a la geología de Uruguay serán llamados sistemas geotérmicos pasivos (Figura 1).

Gradientes mucho más elevados, y más atractivos para el aprovechamiento de la energía geotérmica, se encuentran en las proximidades de centros magmáticos activos o recientemente activos y aquí serán llamados sistemas geotérmicos activos (Figura 1). Éstos son típicos en zonas de subducción (ej. Cascades en EE. UU. o Los Andes en Chile), rifts (ej. Great basin en Nevada, E.E.U.U.), dorsales meso-oceánicas (ej. Islandia) o hot spots (ej. Yellowstone, EE. UU.).

Algunos sistemas de calefacción doméstica hacen uso de la diferencia de temperatura entre el suelo y la atmósfera (*ground heat pumps* o *geoexchange*) y también son clasificados como energía geotérmica. Si bien estos pueden ser significativos para calefacción doméstica e industrial y aplicables en cualquier región de Uruguay, escapan al enfoque de este artículo ya que no explotan una fuente geotérmica subterránea.

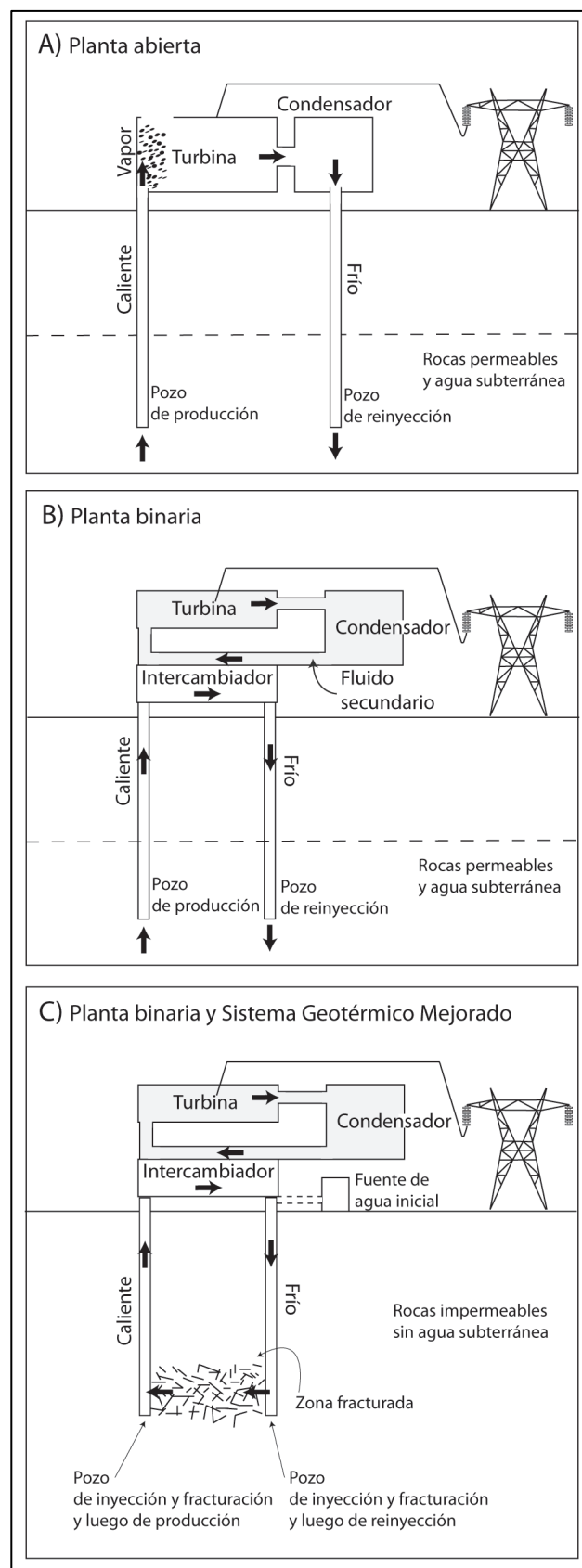
FIGURA 2: Esquema del funcionamiento de distintos tipos de plantas geotérmicas. **A) Planta abierta:** El agua subterránea de alta temperatura asciende por una perforación en forma de vapor, activando una turbina generadora de electricidad. Parte del agua puede ser condensada y reinyectada al acuífero por medio de otra perforación. **B) Planta binaria:** El agua es bombeada por una perforación para alimentar un intercambiador de calor antes de ser reinyectada por otra perforación. El fluido secundario de la planta es calentado en el intercambiador sin entrar en contacto con el agua subterránea. Este fluido de bajo punto de ebullición activa una turbina para generar electricidad, luego es condensada y recirculada. **C) Planta binaria en un sistema geotérmico mejorado:** Una red de fracturas es generada en profundidad por sobrecarga hidráulica entre dos perforaciones. Agua superficial o subterránea somera es inyectada por una perforación y bombeada por otra para crear una circulación en la red de fracturas y captar el calor de la roca. La planta binaria opera como en B).

APLICACIONES SOCIO-ECONÓMICAS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Existen distintas maneras de aprovechar la energía geotérmica para fines socio-económicos. Desde 1892 se utiliza agua subterránea termal para calefacción doméstica e industrial en Boise, Idaho, EE. UU. y desde 1910 en Larderello, Italia (IGA, n.d.). Este tipo de uso no debería ser menospreciado ya que al reemplazar otras fuentes de energía se genera un ahorro económico que puede equivaler a generar energía eléctrica directamente.

Un ejemplo para ilustrar este uso es el hotel Peppermill en Reno, Nevada, EE. UU. La totalidad de la calefacción del hotel fue reemplazada con una fuente geotérmica e incluye 195.000 m² de interiores y 4.000 m² de spas. Se utilizaron dos perforaciones de 1,34 km de profundidad para captar aguas subterráneas de hasta 79 °C a un caudal de 270 m³/h. Se utilizan intercambiadores de calor donde el agua bombeada por una de las perforaciones, calienta el agua de cañería del hotel sin entrar en contacto con ella, para luego ser reinyectada a través de otra perforación en el acuífero. De esta manera se minimiza la pérdida de energía del sistema geotérmico, la disminución del nivel freático y la contaminación del acuífero. La inversión de 9,7 millones de dólares, generó un ahorro energético de 2 millones de dólares anuales y una recuperación de la inversión en 5 años (PP, n.d.).

Sistemas geotérmicos de mayor entalpía, permiten generar energía eléctrica. Es también en Larderello, Italia, donde en 1904 comenzaron los primeros intentos de generar energía eléctrica con fuentes geotérmicas, llegando a generar 127,650 KW en 1942 (IGA, n.d.). Para la generación de electricidad se



utilizan turbinas de vapor, y una o varias perforaciones para captar el calor de la roca a través del agua subterránea. El tipo de planta más básico, llamada de evaporación abierta (Figura 2), es utilizable sólo en sistemas geotérmicos activos de alta entalpía, y utiliza una perforación en rocas saturadas en agua a muy alta temperatura. Durante la despresurización por ascenso, parte del agua entra

en ebullición y se convierte en vapor, pudiendo activar directamente turbinas generadoras de electricidad. Éste es el tipo de plantas que se utiliza en Geysers, California, EE. UU. el principal productor de electricidad geotérmica del mundo, con una capacidad de 1517 MW en 15 plantas, capaces de suministrar energía a una ciudad como San Francisco (Calpine, n.d.). En estas plantas al menos parte del vapor y gases como CO₂ presentes en el subsuelo en sistemas geotérmicos activos, son liberados a la atmósfera. De todas maneras en Geysers, el agua evaporada es captada cuidadosamente y reinyectada para minimizar las emisiones de gases y vapor a la atmósfera. Dada la escasez de recarga natural del acuífero, también se reinyecta agua post-consumo reciclada de condados vecinos para mantener el nivel freático del sistema geotérmico. De manera similar en las plantas tipo *Flash* o *Double Flash*, se incentiva la formación de vapor en uno o dos tanques de evaporación de baja presión con aguas a temperaturas mayores de 180 °C.

Un segundo tipo de plantas son llamadas plantas binarias (Figura 2). En estas plantas el agua subterránea caliente es bombeada a la superficie y se utiliza para calentar un fluido dentro de un circuito cerrado. Esto permite utilizar la energía de sistemas geotérmicos de menor entalpía y más baja temperatura, ya que utilizan fluidos con puntos de ebullición de entre 34 y 50 °C. Se utilizan intercambiadores de calor y el agua bombeada a la superficie pierde calor al calentar el fluido de la planta, pero no entra en contacto con la atmósfera ni la planta, por lo que no sólo no se libera ningún tipo de gases, sino que tampoco se contamina el agua del acuífero y ésta puede ser reinyectada, minimizando el impacto a los niveles freáticos. El fluido de la planta, luego de ser calentado,

entra en ebullición y se utiliza para mover turbinas a vapor en un circuito cerrado. Luego de perder su calor en forma de vapor, éste es condensado y dirigido al intercambiador de calor para comenzar nuevamente el ciclo. Estas plantas también se utilizan en sistemas de alta entalpía ya que son más eficientes que las plantas abiertas. Éste es el caso de las plantas en la zona volcánica de Taupo, en Nueva Zelanda, que generan 750 MW, el 13% del consumo del país (NZGA, n.d.).

Una variante de estas plantas utiliza equipamiento de refrigeración industrial. Dado el bajo costo de la planta, su pequeño tamaño, y la utilización de agua superficial de baja temperatura para la condensación en lugar de un condensador atmosférico, se puede generar energía con aguas termales de relativamente baja entalpía y temperatura, necesitando una diferencia de temperatura entre el agua termal y el agua superficial de tan sólo 38 °C. El mejor ejemplo es la planta de Chena, en Alaska, EE. UU. Allí se extrae agua subterránea a 74 °C con perforaciones de entre 1 y 1,5 km de profundidad para activar un aire acondicionado industrial operado en reverso y agua superficial para condensación de 10 °C. Se generan

entre 400 y 640 KW, luego de una inversión de 2 millones de dólares, recuperada en cuatro años (Chena, n.d.).

Todas estas plantas requieren no sólo de una geología con un gradiente geotérmico relativamente elevado, sino que las rocas afectadas por las altas temperaturas y que almacenan el calor sean porosas o se encuentren fracturadas y en contacto con agua subterránea que pueda captar y transferir el calor a la superficie. Dado que existen grandes cantidades de sistemas geotérmicos activos y pasivos alrededor del mundo que no están en contacto con agua subterránea, en las últimas décadas se ha tratado de desarrollar mecanismos artificiales para introducir agua en los sistemas geotérmicos. Éstos son llamados sistemas geotérmicos mejorados (*enhanced geothermal systems*, Figura 2). En este tipo de plantas, se realizan dos perforaciones y una red de micro-fracturas es generada por sobrecarga hidráulica entre ambas con el fin de generar una comunicación entre el pozo de inyección y el de bombeo. Agua superficial es inyectada por un pozo y bombeada por el segundo, forzando su circulación por la red de fracturas y capturando la energía térmica de la roca para su posterior aprovechamiento en una planta binaria. Los sistemas geotérmicos mejorados pueden ser aplicados a sistemas geotérmicos activos y someros (*Hot Dry Rock*) como en centros experimentales en Newberry, Oregon, EE. UU. y Ogachi en Japón. Pero también en sistemas geotérmicos pasivos y profundos. En estos últimos se utilizan perforaciones de 5 o más kilómetros de profundidad en rocas graníticas que generen altas temperaturas por decaimiento radioactivo natural, aisladas por rocas de baja conductividad térmica más cercanas a la superficie. Varias plantas en distintos estados de desarrollo experimental o producción han sido instaladas en el mundo. Soultz-sous-Forêts en Francia cuenta con tres perforaciones de 5 km de profundidad y es tal vez el mejor ejemplo ya que este sitio ha sido estudiado desde 1987 (MIT, 2006). Desde el 2008 una planta piloto produce 1.5 MW. En Australia, una planta piloto de 1 MW en Cooper Basin terminó recientemente su fase de testeo, demostrando la viabilidad para generar energía en este tipo de ambiente geológico. Las expectativas son generar hasta 500 MW con un set de perforaciones de ~4.5 km de profundidad y varias plantas binarias (Geodynamics, n.d.).

IMPACTOS AMBIENTALES

Como cualquier actividad humana, aprovechar la energía geotérmica no está libre de impactos. Estos varían dependiendo del tipo de sistema geotérmico y el tipo de planta utilizada, y en muchos casos son muy bajos.

Las plantas binarias para generar energía eléctrica y el uso de intercambiadores de calor para calefacción

no contaminan el agua subterránea, ya que ésta nunca entra en contacto con la planta y es reinyectada al acuífero luego de ser utilizada. Las perforaciones tienen encamisado de acero y cemento continuo para evitar contaminaciones. En EE. UU. donde existen varios tipos de plantas geotérmicas, no se han reportado casos de contaminación del agua subterránea o superficial (NREL, 2012). En los casos que se utiliza agua superficial para el circuito de condensación, los impactos son similares a cualquier tipo de central térmica, dado que requieren consumo de agua. Sin embargo ésta también puede ser utilizada en un circuito cerrado.

En las plantas binarias, la emisión de gases a la atmósfera es nula. Sin embargo éste sí es un problema en las plantas de evaporación abierta. En especial en sistemas geotérmicos activos, donde las aguas subterráneas pueden estar cargadas en H_2S , CO_2 , CH_4 entre otros gases. De todas maneras, las emisiones son mucho menores que en otras fuentes de energía. Por ejemplo la emisión de SO_2 a través del H_2S presente en el agua subterránea es 30 veces menor en plantas geotérmicas que quemando carbón para plantas térmicas, una de las fuentes de energía más utilizadas en el mundo (NREL, 2012). De todos modos, las plantas de evaporación abierta no son aplicables al tipo de sistemas geotérmicos presentes en Uruguay, donde además no existen aguas subterráneas cargadas por gases magmáticos.

El área superficial utilizada varía dependiendo del tipo de planta, pero en general son bajas comparadas con otras fuentes de energía. A modo comparativo en Geysers, EE. UU., la planta geotérmica más grande del mundo tiene una potencia instalada (1517 MW) equivalente al 80% de la potencia instalada de la represa de Salto Grande en Uruguay (1890 MW). Mientras que la huella superficial de Geysers es de 7,6 hectáreas por MW instalado, en Salto Grande es de 39 hectáreas por MW (SG, 2012; Calpine, n.d.). Más aún, el área ocupada por las plantas geotérmicas no es profundamente modificada como en las represas hidroeléctricas, y en este cálculo se incluyen las áreas entre las plantas que no son directamente utilizadas, por lo que el número real de hectáreas por MW es en realidad menor.

La subsidencia del suelo puede ser un problema cuando se extrae mayor cantidad de agua del acuífero de la que se repone y desciende el nivel freático. En general esto es muy bajo en plantas binarias donde se reinyecta el agua utilizada.

En cuanto a los sistemas geotérmicos mejorados, el *Swiss Deep Heat Mining Project*, generó controversias en torno a estas plantas por la localización de una de las perforaciones cercanas al centro de la ciudad de Basilea y la creación de un sismo de 3.5 en el año 2007 que provocó daños en la infraestructura de la ciudad por US\$ 8,6 millones y congeló los emprendimientos Suizos (Swissinfo, n.d.). Si bien esto no ha sido un problema en los otros proyectos ya instalados y las magnitudes sísmicas no

implican un riesgo humano, estas perforaciones profundas deben estar preventivamente alejadas de los centros poblados, infraestructura importantes y fallas preexistentes (NREL, 2012).

ENERGÍA GEOTÉRMICA EN LA CUENCA DE PARANÁ

La Cuenca de Paraná en el Noroeste de Uruguay es la zona del país que por sus características geológicas ofrece el mayor potencial para desarrollar aplicaciones de energía geotérmica y será la tratada en este artículo. Esto no quiere decir que otras áreas del país no tengan potencial. La Cuenca Santa Lucía o zonas con grandes intrusiones graníticas cubiertas por sedimentos en el basamento Precámbrico también podrían ser de interés en un futuro al disponer de mayor información geológica. Por otro lado, los *Ground Heat Pumps* o *Geoxchanges*, no discutidos en este artículo, podrían ser aplicados en cualquier parte del territorio.

La Cuenca de Paraná en Uruguay ocupa 94.000 km² y su estratigrafía varía en distintas zonas del país, encontrándose sucesiones sedimentarias desde el Devónico hasta el Cretácico. Para los fines de este artículo, la zona Oeste de la cuenca (mayoritariamente en los departamentos de Artigas, Salto y Paysandú) es la relevante y será la única discutida. En esta zona la cuenca ocupa 43.000 km² y presenta al menos 2300 m de relleno volcánico-sedimentario en Uruguay (ver Bossi *et al.*, 1998). Estudios geofísicos recientes evidencian secciones aún más profundas. Un relevamiento magnetotélúrico (Oleaga *et al.*, 2005) y una sección sísmica en el departamento de Salto (Schuepbach Energy & Petrel Energy, 2014) indican secciones que alcanzan los 3600 m y tal vez hasta 4500 m.

En la zona Oeste de la cuenca, las secuencias sedimentarias inferiores al Cretácico están en su mayoría cubiertas por 38.000 km² de coladas basálticas Cretácicas (~133 Ma) del *Large Igneous Province* de Paraná-Etendeka. Éstas adquieren hasta 1200 m de espesor conjunto, y son agrupadas bajo el nombre de Formación Arapey (Bossi, 1966). Los basaltos confinan acuíferos alojados en las rocas sedimentarias infrayacentes. Estos acuíferos son recargados en la zona aflorante de los sedimentos pre-basaltos en el Este de la cuenca (5.000 km², con la excepción de una ventana en el departamento de Artigas) y agrupados bajo el nombre de Sistema Acuífero Guaraní (Araújo *et al.*, 1995). La baja conductividad térmica de los basaltos (en promedio 1,95 Wm⁻¹K⁻¹ medido en otros basaltos del mundo, Zoth & Haenel, 1988) hace que éstos actúen de aislantes del calor de los acuíferos, acentuando el gradiente geotérmico de la zona y elevando la temperatura de los mismos. Es también posible que la temperatura varíe en profundidad dependiendo de la presencia de rocas con alta generación de calor por decaimiento radioactivo, como ser pelitas Carbonífero-Pérmicas en la Cuenca de Paraná o más

probablemente grandes cuerpos intrusivos graníticos en el basamento de la misma. En Uruguay el gradiente geotérmico está estimado en un promedio de $28.6\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ (Montaño & Peel, 2003), aunque existen mayores en la Cuenca de Paraná en Brasil.

De todas maneras este gradiente está estimado con la información obtenida por medio de una decena de perforaciones de aproximadamente 1.000 m de profundidad, cercanos al contacto superior con los basaltos de Arapey. Es posible que el gradiente

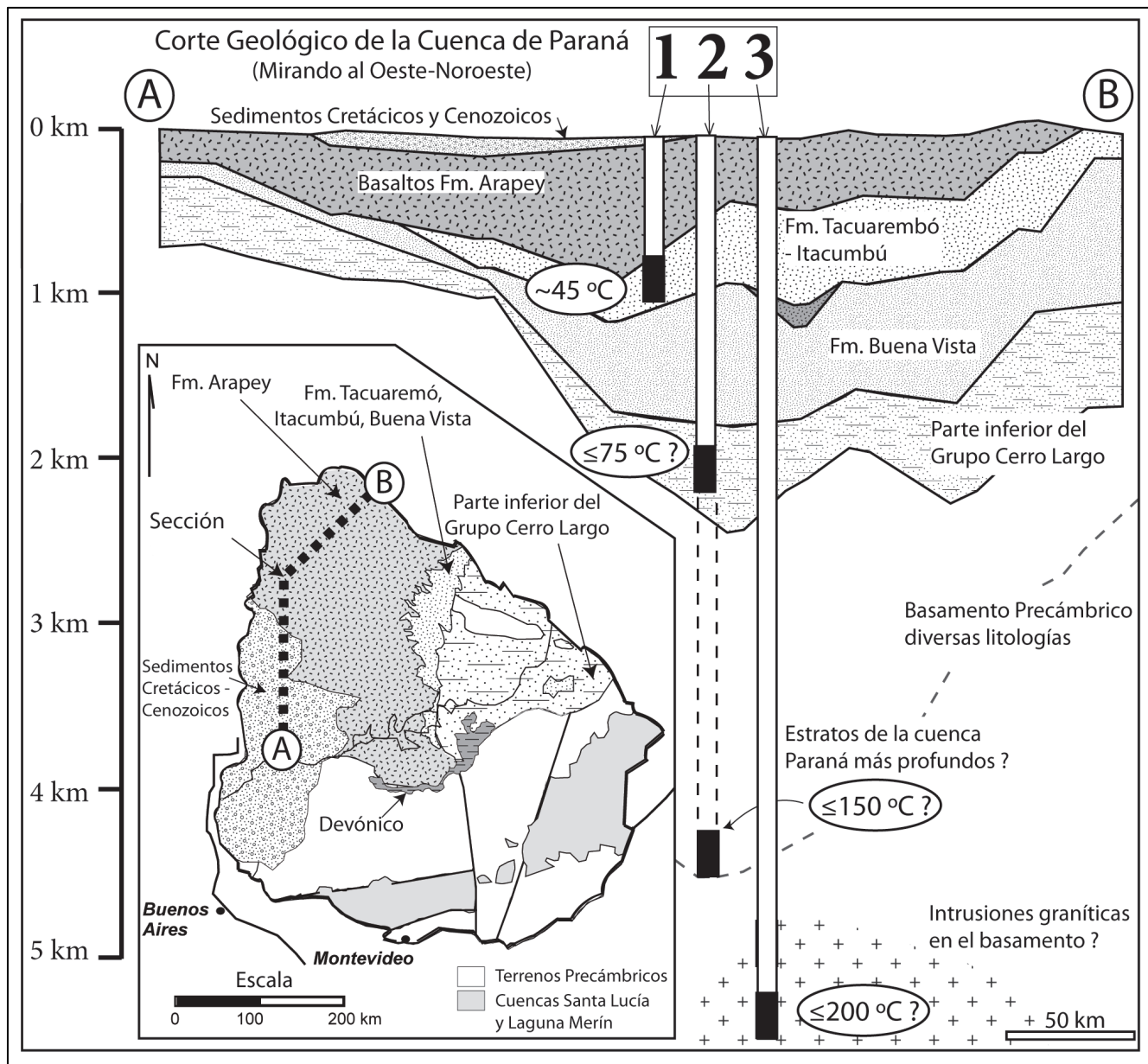


FIGURA 3: Corte geológico esquemático a través de la Cuenca de Paraná (modificado de De Santa Ana & Veroslavsky, 2003) mostrando los espesores de las distintas sucesiones sedimentarias y coladas de basaltos sobre el basamento Precámbrico. La geología del basamento es hipotética con el fin de ilustrar la presencia de posibles zonas graníticas. La profundidad de estratos infrayacentes al Carbonífero-Pérmico también es hipotética y tal vez presentes fuera de la sección. 1) Perforaciones que captan agua templada del Sistema Acuífero Guaraní utilizada por la industria turística y con posibles aplicaciones para calefacción doméstica e industrial. 2) Perforaciones hipotéticas hasta los sedimentos Carbonífero-Pérmico más profundos conocidos hasta el momento y secciones inferiores hipotéticas, con posibles usos para generación de energía eléctrica en plantas binarias. 3) Perforaciones profundas hipotéticas en el basamento con el fin de crear un sistema geotérmico mejorado para la generación de energía eléctrica en plantas binarias.

disminuya a mayor profundidad dado que habría transmisión de calor por convección en los acuíferos, lo que contribuye a el aumento de la conductividad térmica de la roca, mientras que sólo hay conducción en los basaltos de baja conductividad térmica (Figura 1). Del mismo modo tampoco se conoce como varía el gradiente geotérmico en profundidad, por debajo del Sistema Acuífero Guaraní.

Si bien debe existir un flujo desde la zona de recarga en el Este hacia la zona confinada en el Oeste (Montaño *et al.*, 1998), también existe una compartimentación estructural al menos parcial, controlada por fallas, horsts y grabbens en el basamento y diques y sills de la Fm. Arapey. Por otro lado también existe un flujo a escala regional desde y hacia los países fronterizos (ver Gastmans *et al.*, 2012).

En la zona Oeste, las secciones inferiores incluyen diamictitas, pelitas, siltitos y areniscas grises Carbonífero-Pérmicas con materia orgánica preservada y contenidos variables de sales. Estas litologías fueron depositadas en ambientes reducidos glaciares a peri-glaciares y mares someros intracratónicos restringidos a abiertos y se agrupan en la parte inferior a media del Grupo Cerro Largo (Goso, 1995; De Santa Ana *et al.*, 2006). Esta sección en conjunto tiene espesores que alcanzan al menos 1300 m en esta zona, pero no distribuidas uniformemente en toda la cuenca, y los acuíferos conocidos hasta el momento, son de baja permeabilidad y relativamente alto contenido de sales.

La sección suprayacente, está conformada por areniscas rojizas, finas a medias intercaladas con menor cantidad de pelitas y conglomerados seguidos de areniscas bien seleccionadas con estratificación cruzada de alto ángulo intercaladas con menores cantidades de siltitos y pelitas de coloraciones rojizas. Estas litologías fueron depositadas desde el Pérmico tardío (Formaciones: Yaguarí, Bossi, 1966 y Buena Vista, Andres & Ferrando, 1982) hasta la transición entre Jurásico-Cretácico (Formaciones: Itacumbú, De Santa Ana & Veroskavsky, 2004 y Tacuarembó, Ferrando & Montaña, 1986). Fueron depositadas en ambientes oxidantes continentales dominados por ambientes eólicos, fluviales y lacustres. Esta sección presenta espesores conjuntos de al menos 760 m en la zona Oeste de la cuenca.

Los acuíferos asociados al Carbonífero-Pérmico temprano y los asociados al Pérmico tardío y Jurásico-Cretácico probablemente se encuentran aislados unos de los otros, dado las características diferentes de sus aguas muestreadas en superficie (Montaño & Peel, 2003). El Carbonífero-Pérmico cuenta con aguas salobres, mientras que Pérmico tardío y Jurásico-Cretácico con aguas dulces. La mayoría de las perforaciones realizadas hasta el momento en los departamentos de Salto, Paysandú y Artigas presentan flujo artesianos dado su confinamiento, los caudales varían entre 50 y 800

m³/h y las temperaturas medias en superficie varían entre 39 y 48 °C (ver Montaño & Peel, 2003).

POSIBLES APLICACIONES GEOTÉRMICAS EN URUGUAY

Los acuíferos confinados, templados y sobrepresurizados (~45 °C) en la parte superior del Sistema Acuífero Guaraní en la Cuenca de Paraná (Figura 3) podrían presentar usos directos que signifiquen un ahorro de energía eléctrica de otras fuentes. Estos acuíferos, hoy utilizados sólo con fines recreativos por la industria turística, también podrían ser aprovechados directamente para calefacción doméstica o industrial, incluyendo la calefacción en la industria hotelera, invernaderos para agricultura y aplicaciones en piscicultura (ver Consorcio Guaraní, 2008). En la actualidad las aguas explotadas en resorts turísticos son descartadas al sistema superficial. Sin embargo, podrían ser utilizadas para calefacción previo a su descarte y finalmente ser utilizadas para riego al bajar su temperatura. El agua también podría ser utilizada directamente para fines de calefacción a través de un circuito cerrado, de manera de no contaminarla y tal vez reinyectada en el acuífero luego de su uso, o utilizarla para el suministro de agua potable luego de haber utilizado su calor. De todas maneras no todas las aguas del SAG son potables, dado que han sido reportados niveles de arsénico elevados por sobre los 100 µg/litro recomendados por la OMS (Gastmans *et al.*, 2010). Diversos usos directos para estas aguas ya han sido sugeridos por otros geólogos (*i.e.* Montaño, 2004; Consorcio Guaraní, 2008) pero hasta el momento con pocas repercusiones.

Las rocas Carbonífero-Pérmicas se extienden hasta al menos ~2.300 m de profundidad, por lo que de mantenerse en profundidad el gradiente geotérmico estimado para el área, los acuíferos albergados en ellas podrían presentar temperaturas de hasta 75 °C (Figura 3). Con estas aguas se podrían generar bajas cantidades de energía eléctrica utilizando una planta de evaporación y expansión con condensación por agua superficial. Estas plantas generarían baja cantidad de energía, pero su bajo costo y pequeño tamaño, las hace convenientes para suministrar energía a pequeños poblados o industrias.

De confirmarse la existencia de esta temperatura en profundidad se podrían concebir plantas similares a la de Chena, en Alaska, EE. UU. Allí se extrae agua subterránea a 74 °C con perforaciones de entre 1 y 1,5 km de profundidad para activar un aire acondicionado industrial operado en reverso y agua superficial para condensación de 10 °C. Se generan entre 400 y 640 KW. El costo de esta planta fue de 2 millones de dólares y fueron recuperados en cuatro años (Chena, n.d.).

Por otro lado, de constatare la presencia de rocas sedimentarias entre 3.500 y 4.500 m de profundidad, podrían existir acuíferos con temperaturas máximas

de entre ~ 100 y $145\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto permitiría la instalación de plantas binarias de mayor envergadura y así generar suficiente energía eléctrica para aportar a la red nacional. De confirmarse la sobre-presurización de los acuíferos de los acuíferos profundos y la naturaleza artiana de perforaciones profundas, se producirían significativos ahorros económicos en las plantas de generación de energía, beneficiando enormemente la factibilidad de su instalación y rentabilidad en comparación a plantas que requieran el bombeo de agua desde profundidades mayores a 2.000 m . Si estos sedimentos profundos se encontrasen secos pero fuesen permeables, se podría inyectar y circular agua superficial o de acuíferos subyacentes (sistema geotérmico mejorado) y obtener resultados similares.

De confirmarse esta geología, se podrían concebir plantas similares a la de Landau, en el graben superior del Rhein de Alemania. Allí se explota un sistema geotérmico mejorado con una perforación de 3.000 m de profundidad que capta agua a $155\text{ }^{\circ}\text{C}$. En superficie esta agua genera electricidad en una planta binaria con una capacidad de 3 MW y una producción de 22 GWh por año. Al salir de la planta el agua se encuentra a $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se utiliza para alimentar un sistema de calefacción cerrado para 1.000 viviendas. Al finalizar su utilización el agua se encuentra a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y es re-inyectada a través de una perforación de 3.170 m . El *offset* de CO_2 se estima en 6.000 toneladas. La inversión fue de $3,6$ millones de dólares (Clean Energy, n.d.). Otras plantas en Alemania presentan características similares. La planta de Insheim también en el Rhein tiene una capacidad de $4,8\text{ MW}$ captando agua a $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 3.500 metros de profundidad (Bestec, n.d.). Varias plantas en la región Bavaria tienen una capacidad de entre 3 y 5 MW . Una de ellas, Unterhaching tiene una capacidad de $3,3\text{ MW}$ captando aguas a $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 3300 metros de profundidad y produciendo $8,4\text{ GWh}$ por año (Ganz *et al.*, 2013).

Finalmente, sistemas geotérmicos mejorados podrían ser creados a través de perforaciones profundas, mayores a 5 km , penetrando el basamento de la cuenca Paraná y alcanzando rocas con temperaturas posiblemente mayores a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 3). Para este tipo de emprendimientos, rocas graníticas como las presentes en algunas zonas del basamento cristalino aflorante en el sur de Uruguay son las preferidas, ya que generan naturalmente mayores temperaturas por decaimiento radioactivo. El efecto aislante de los basaltos de la Formación Arapey, es también una característica buscada en este tipo de proyectos. La alta disponibilidad de agua superficial y subterránea en el litoral, es también un factor importante que aporta a la factibilidad geológica y económica de crear y producir un sistema geotérmico mejorado.

De constatare la existencia de granitos con alta producción de calor en el basamento de la Cuenca de Paraná, se podrían concebir plantas similares a las que están siendo desarrolladas en Cooper basin, Australia. En esta cuenca, perforaciones profundas

han constatado temperaturas entre $243\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $264\text{ }^{\circ}\text{C}$ en perforaciones de entre 4.200 y 4.600 metros de profundidad. Allí, gruesas secciones de rocas sedimentarias con bajo contenido de agua y baja conductividad térmica aíslan el calor producido por intrusivos graníticos a más de 4.000 metros de profundidad. La planta piloto Habanero cuenta con 2 perforaciones de aproximadamente 4 km de profundidad donde fue desarrollado un sistema geotérmico mejorado y una capacidad instalada de 1 MW . Esta planta ha culminado su fase piloto en Octubre del 2013 demostrando la capacidad de generar energía en este tipo de geología. El costo de cada perforación fue de aproximadamente 50 millones de dólares, pero avances tecnológicos alcanzados durante la fase piloto indican que el costo de las próximas perforaciones será de aproximadamente 15 millones de dólares. Las expectativas son generar hasta 500 MW con un set de perforaciones de $\sim 4,5\text{ km}$ de profundidad y varias plantas binarias (Geodynamics, n.d.).

De todas maneras, las temperaturas en profundidad son especulativas y deben ser tomadas con cautela. Como fue mencionado anteriormente, estas temperaturas son estimadas en base a los valores del gradiente geotérmico calculado con datos de perforaciones de aproximadamente 1.000 m de profundidad que captan aguas cercanas al contacto superior de los acuíferos con los basaltos de la Formación Arapey. El calor se transmite a través de ellos solamente por conducción, y por su baja conductividad térmica el gradiente geotérmico es alto. Por debajo de los 1.000 m , ya que los sedimentos albergan acuíferos, el calor también se puede transmitir más fácilmente por convección, por lo que el gradiente geotérmico podría ser mucho más bajo (Figura 1), afectando los pronósticos hechos en este artículo. Las variaciones del gradiente geotérmico por debajo del Sistema Acuífero Guaraní son desconocidas. Incluso el gradiente podría tener grandes variaciones de existir estratos secos de espesores importantes y de baja conductividad térmica entre los distintos acuíferos.

Una red de plantas binarias, tanto en acuíferos profundos como en sistemas geotérmicos mejorados en el basamento, podrían generar cantidades significativas de energía eléctrica para el consumo departamental o nacional, aunque más información es necesaria antes de hipotetizar cantidades.

La Cuenca de Paraná se extiende en Paraguay, el Sur de Brasil y Este de Argentina con similar estratigrafía que en Uruguay, aunque otras secuencias sedimentarias y mayores espesores son comunes, lo que posibilita la aplicación de este tipo de emprendimientos con algunas variantes en esos países.

Por último, cabe recalcar que los *Ground Heat Pumps*, no tratados en este artículo también pueden tener un impacto importante en el consumo energético del país y el *offset* de las emisiones de

CO₂. Estos pueden ser aplicados en cualquier parte del territorio Uruguayo ya que dependen mayoritariamente de el suelo y en menor medida de la geología específica de cada área. Si bien el mayor uso es en calefacción y refrigeración doméstica, también pueden ser utilizados a escala industrial (ej. Ball Sate University en Indiana y Richard Stockton College en New Jersey, EE. UU., Clean Energy, n.d.).

CONCLUSIONES Y PENSAMIENTOS PARA EL FUTURO

Aunque en Uruguay no existen sistemas geotérmicos de alta entalpía y temperatura asociados a magmatismo, existen las temperaturas y caudales necesarios para aprovechar económicamente la energía geotérmica. Éstos se encuentran en el noroeste del país en los departamentos de Paysandú, Salto y Artigas. En esta zona, en la Cuenca de Paraná hasta 1.000 m de basaltos Cretácicos confinan y sobrepresurizan acuíferos albergados en rocas sedimentarias depositadas entre el Carbónífero y el Jurásico, recargados en la zona Este de la cuenca donde éstas afloran. La baja conductividad térmica de los basaltos (estimada $1,95 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ en otros basaltos del mundo) disminuye la pérdida de calor geotérmico, aumentando el gradiente geotérmico a un promedio de $28,6 \text{ }^{\circ}\text{C/m}$. Es posible que el gradiente sea menor por debajo de los 1.000 m por la transmisión de calor por convección de agua subterránea en el Sistema Acuífero Guaraní y acuíferos infrayacentes. Del mismo modo, el gradiente geotérmico por debajo de estos acuíferos es desconocido hasta el momento. Probablemente, intrusivos graníticos Precámbricos generan calor por decaimiento radioactivo, y su distribución en el basamento debajo de la Cuenca de Paraná tal vez genere variaciones locales en el gradiente geotérmico.

En la zona noroeste de la cuenca, el gradiente geotérmico elevado puede ser explotado de distintas maneras. Las aguas templadas y sobrepresurizadas del Sistema Acuífero Guaraní ($-45 \text{ }^{\circ}\text{C}$, -1.000 m), presentan un costo extractivo prácticamente nulo, y además del uso recreativo actual posibilitarían la calefacción doméstica o industrial, reduciendo el consumo de otras fuentes de energía.

Es también posible pensar en la generación de energía eléctrica para uso local con aguas de los posibles acuíferos también sobrepresurizados Carbonífero-Pérmicos infrayacentes ($\leq 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$, -2.300 m) utilizando plantas binarias enfriadas por agua superficial. De constatarse la existencia de rocas sedimentarias a mayor profundidad, se podrían explotar posibles acuíferos profundos o crear sistemas geotermales mejorados si no se encontrase agua subterránea ($\leq 145 \text{ }^{\circ}\text{C}$, -4.500 m). En estos casos, plantas binarias convencionales de mayor

envergadura podrían impactar el consumo eléctrico nacional.

Por último, sería también posible la generación de energía eléctrica en plantas binarias a través de un sistema geotérmico mejorado en el basamento granítico a $>5.000 \text{ m}$ de profundidad con el fin de encontrar temperaturas cercanas a los $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, con la posibilidad entonces de generar cantidades significativas de energía para el país.

La implementación de estas tecnologías requiere estudios detallados de las variaciones del gradiente geotérmico en la Cuenca de Paraná, en especial en profundidades mayores a los 1.000 m . Se debe también estudiar la composición y flujo del agua en los diferentes acuíferos, comprender la estratigrafía y geología estructural de la cuenca a través de geofísica y perforaciones y localización de intrusiones graníticas en su basamento. Si bien el conocimiento en estas áreas ha avanzado en las últimas décadas, y más aún desde las nuevas campañas de exploración de hidrocarburos, no han habido estudios detallados enfocados en generar la información básica para estudiar la viabilidad de generación de energía eléctrica de fuentes geotérmicas. Es también importante conocer estas variables en detalle para diseñar planes que posibiliten un desarrollo sustentable, manteniendo los niveles freáticos de los distintos acuíferos, sin contaminar sus aguas y manteniendo la energía geotérmica del sistema balanceada.

Si bien el uso directo para calefacción con aguas del acuífero guaraní podría ser implementado en el corto plazo, es importante comenzar a estudiar las posibilidades de generación de energía eléctrica a la brevedad ya que desde el momento en que se comienza a generar la información básica hasta que estén dadas las condiciones para desarrollar proyectos concretos pueden transcurrir varios años o décadas. Más aún teniendo en cuenta que las tecnologías de generación de energía deben ser adaptadas a las características geológicas e hidrogeológicas de cada área.

Es importante notar que costosos equipos geofísicos y de perforación profunda, necesarios para la exploración geotérmica estarán disponibles en el país durante la exploración de hidrocarburos, por lo cual sería conveniente aprovechar la disponibilidad de este equipamiento, que muchas veces tiene un costo prohibitivo para pequeños proyectos geotérmicos.

Agradecimientos

A John Dilles, Mark Coolbaugh, Dave Boden y Chris Heinrich por la discusión sobre estas ideas. A Leda Sanchez y Gerardo Veroslavsky por sus comentarios y aporte de información. A los dos revisores de la

SUG por la revisión y comentarios que ayudaron a mejorar este artículo.

Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. 162 pp.

BIBLIOGRAFÍA

ANDREIS, R. R. & FERRANDO, L. A. (1982) Sobre la existencia de Triásico en el departamento de Cerro Largo (Resumen). Boletín Proyecto N°42 IUGS-UNESCO, 5: 32. Montevideo. Uruguay.

ARAÚJO, L.M. FRANCIA, A.B. & POTTER, P.E. (1995) Acuífero Gigante del Mercosur en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay: Mapas hidrogeológicos de las formaciones Botucatu, Piramboia, Rosario del Sur, Buena Vista, Misiones y Tacuarembó. UFPR y Petrobras, 16 p Curitiba, Paraná - Brasil.

BASTEC (n.d.) Obtenido de: <http://www.bestec-for-nature.com/j2510m/index.php/en/projects-en/insheim-en> en Octubre del 2014.

BEAULIEU, J., SMOLENSKI, R., NIETHCH, C., TOWNSEND-SMALL, A. & ELOVITZ, M. (2014) High Methane Emissions from a Midlatitude Reservoir Draining an Agricultural Watershed. **Environmental Science and Technology**, 48, 11100-11108. <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es501871g>

BOSSI, J. (1966) Geología Del Uruguay. Colección Ciencias No. 2. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República.

BOSSI, J., FERRANDO, L. A., MONTAÑA, J., CAMPAL, N., MORALES, H., GANCIO, F., SCHIPILOV, A., PIÑEYRO, D. & SPRECHMANN, P. (1998) **Carta Geológica Del Uruguay**. Escala 1/500.000. Memoria Explicativa.

CALPINE (n.d.) Obtenido de: www.geysers.com en Diciembre del 2014.

CERNUSCHI, F. (2013) Generación de Energía Geotérmica y sus Potenciales Aplicaciones en Uruguay. **VII Congreso Uruguayo de Geología**, Montevideo, Uruguay.

CHENA (n.d.) Obtenido de: <http://www.chenahotsprings.com/geothermal-power/> en Diciembre 2014.

CLEAN ENERGY (n.d.) Obtenido de: http://www.cleanenergyactionproject.com/CleanEnergyActionProject/Geothermal_Technologies_Case_Studies_files/Landau%20EGS%20Geothermal%20CHP%20Plant.pdf en Octubre del 2014.

CONSORCIO GUARANÍ (2008) Evaluación del Potencial de Usos Termales y No Termales del Agua del SAG. Proyecto para la Protección

DE SANTA ANA, H. & VEROSLAVSKY, G. 2003. La tectosecuencia volcanosedimentaria de la Cuenca Norte del Uruguay. Edad Jurásico-Cretácico temprano. En: Cuenas Sedimentarias de Uruguay: Geología, Paleontología Y Recursos Naturales. Mesozoico. VEROSLAVSKY, G., UBILLA, M. & MARTÍNEZ, S. Eds., 51-74. Dirac - Facultad de Ciencias.

DE SANTA ANA, H., GOSO, C., DANERS, G. 2006. Cuenca Norte: Estratigrafía del Carbonífero-Pérmico. En: Cuenas Sedimentarias de Uruguay: Geología, Paleontología y Recursos Naturales. Paleozoico. VEROSLAVSKY, G., UBILLA, M. & MARTÍNEZ, S. Eds., 147-203. Dirac - Facultad de Ciencias.

EPA (n.d.) Obtenido de <http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/n2o.html> en Diciembre del 2014.

FERRANDO, L. A. & MONTAÑA, J. R. 1986 Esquema geológico de los alrededores de Tacuarembó. IV Reunión Internacional Proyecto N° 193: Silúrico - Devónico de América Latina. Tacuarembó. Uruguay.

GANZ, B., RÜDIGER, S., RÜDIGER, S. & BURKHARD, S. (2013) Geothermal Energy Use in Germany. **European Geothermal Congress 2013**. Pisa, Italy. http://www.geotis.de/homepage/Ergebnisse/2013_EGC_Ganz.pdf

GASTMANS D.; VEROSLAVSKY G.; CHANG K.H.; MARMISOLLE J.; & OLEAGA A. (2010) Influência do arcabouço hidroestratigráfico nas ocorrências de arsênio em águas subterrâneas ao longo do Corredor Termal do Rio Uruguai (Argentina - Brasil - Uruguai). **Geociencias**, Vol. 29 (2): 301-320.

GASTMANS, D., VEROSLAVSKY, G., KIANG CHANG, H., CAETANO-CHANG, M. R. & NOGUEIRA PRESSINOTTI, M. (2012) Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. **Boletín Geológico y Minero**, 123 (3): 249-265.

GEODYNAMICS (n.d.) Obtenida de: <http://www.geodynamics.com.au/Our-Projects/Innaminka-Deeps.aspx> en Diciembre del 2014.

GLASSLEY, W. (2014) Geothermal Energy, Renewable Energy and the Environment. Second Edition. CRC Press.

GOSO, C. (1995) Analise Estratigrafica Da Formação San Gregorio Na Borda Leste Da Bacia Norte

- Uruguaya. Dissertação de Mestrado, IGCE-Unesp, Rio Claro, SP, 214 pp.
- HOLDMANN G. (2007) Final Project Report Prepared For The Alaska Energy Authority By Chena Power Company. February 4, 2007. 37pp. http://www.akenergyauthority.org/Reports%20and%20Presentations/FinalProjectReport_ChenaPowerGeothermalPlant.pdf
- IGA (n.d.) International Geothermal Association. Obtenido de: http://www.geothermal-energy.org/what_is_geothermal_energy.html en Diciembre del 2014.
- LUBIMOVA, E.A. (1968) Thermal history of the Earth. En: **The Earth's Crust and Upper Mantle**. American Geophysical Union. Geophys, 13, 63–77.
- MCKENZIE, D., JACKSON, J. & PRIESTLEY, K. (2005) Thermal structure of oceanic and continental lithosphere. **Earth and Planetary Science Letters**, 233, 337-349.
- MIT (2006) The Future of Geothermal Energy. Impacts of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. An assessment by an MIT-led interdisciplinary panel.
- MONTAÑO, J. (2004) Recursos hídricos subterráneos. El sistema acuífero Guaraní. En: Cuencas Sedimentarias de Uruguay: Geología, Paleontología y Recursos Naturales. Mesozoico. VEROSLAVSKY, G., UBILLA, M. & MARTÍNEZ, S. Eds., 191-212. Dirac - Facultad de Ciencias.
- MONTAÑO, J. & PEEL, E. (2003) Geothermalism in the Guaraní Aquifer System, Uruguay. **Geothermal Resources Council Transactions**, 27, 623-627.
- MONTAÑO, J., TUJCHNEIDER, O., AUGÉ, M., FILI, M., PARI, M., D'ELIA, M., PEREZ, M., NAGY, M.I., COLLAZO, P. & DECOUD, P. (1998) Sistemas Regionales En América Latina-Sistema Acuífero Guaraní - Capítulo Argentino - Uruguayo. **Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral**, Santa Fe. 217 pp.
- MOSS, A. R., JOUANY, J. P., & NEWBOLD, J. (2000) Methane production by ruminants: its contribution to global warming. **Annales de Zootechnie**, 49, 231-254 pp.
- NREL (2012) Renewable Electricity Futures Study. En: HAND, M.M., BALDWIN, S., DEMEO, E., REILLY, J.M., MAI, T., ARENT, D., PORRO, G., MESHEK, M. & SANDOR, D. Eds. 4 vols. NREL/TP-6A20-52409. Golden, CO. National Renewable Energy Laboratory. http://www.nrel.gov/analysis/re_futures/.
- NZGA (n.d.) Obtenido de: http://www.nzgeothermal.org.nz/elec_geo.html en Diciembre del 2014.
- OLEAGA, A., CORBO, F., DE LOS SANTOS, J., SILVEIRA, L., LARENZE, G., ZAMANILLO, E. & ARZATE, J. (2005) Investigación geofísica de la estructura geológica de la cuenca Chaco-Paranense, en un área centrada en las ciudades Salto (Uruguay) y Concordia (Argentina). Proyecto para la protección ambiental y desarrollo sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. Fondo de Universidades. 61 pp.
- OLIVET, B. (2014) Informe: Medio Ambiente y Energía en Uruguay. Aspectos de la temática energética desde una visión ambiental. AECID. 107 pp.
- OLIVIER, V., GOFFE, B. & ARNDT, N. (2013) Metals for a Low-Carbon Society. **Nature Geoscience** 6 (11): 894-96.
- PATIN, S.A. (1999) Environmental Impact of the Offshore Oil and Gas Industry. EcoMonitor Pub. 425 pp
- POLLACK, H.N., HURTER, S.J. & JOHNSON, J.R. (1993) Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. **Rev. Geophys.** 31, 267–280
- PP (n.d.) Obtenido de: <http://www.peppermillreno.com/about-us/going-green/geothermal-heating> en Diciembre del 2014
- RONDA URUGUAY III (n.d.) Obtenido de: <http://www.rondauruguay.gub.uy> en Diciembre del 2014.
- SCHUEPBACH ENERGY & PETREL ENERGY, 2014. Obtenido de: <http://petreleenergy.com/IRM/Company/ShowPage.aspx/PDFs/1409-37703536/InvestorPresentation> en Diciembre del 2014.
- SG (2012) http://www.saltogrande.org/ficha_tecnica.php
- STACEY, F.D. & LOPER, D.E. (1988) Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology. **Phys. Earth. Planet. Inter.** 53, 167 - 174.
- STAFFELL, I. & GREEN, R. (2014) How does wind farm performance decline with age? **Renewable Energy journal**, 66, 775-786. <http://imprl.biz/1ed8O9g>
- STRIVASTAVA, K. & SINGH, R.N. (1998) A model for temperature variations in sedimentary basins due to random radiogenic heat sources. **International Geophysical Journal**, 135.

SWISSINFO (n.d.) Obtenido de:
<http://www.swissinfo.ch/eng/earth-shaking-energy-project-cleared-in-court/7946434> en Diciembre del 2014.

TULLOS, D. (2009) Assessing the Influence of Environmental Impact. Assessments on Science and Policy: An Analysis of the Three Gorges Project. **Journal of Environmental Management** 90, 208-213.

UNCTAD (2010) The Future Energy Matrix and Renewable Energy: Implications for Energy and Food Security: note. United Nations Conference on Trade and Development. Trade and Development Board. 18 pp. Ginebra, 2010.

UNFCCC (n.d.) Obtenido de:
http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php en Diciembre del 2014.

URUGUAY XXI (n.d.) Informe de Comercio Exterior de Uruguay: Enero 2014. Uruguay XXI. Instituto de Promoción de Inversiones y Exportaciones. Obtenido de:
<http://www.uruguayxxi.gub.uy/exportaciones/wp-content/uploads/sites/2/2014/09/Informe-de-Comercio-Exterior-de-Uruguay-Enero-20141.pdf> en diciembre de 2014.

USGS (2011) Assessment of Potential Shale Gas and Shale Oil Resources of the Norte Basin, Uruguay, 2011. Fact Sheet 2011-3100. US Department of the Interior and US Geological Survey

WARD, O., BAGALE, M., DANN, C., & FLAHERTY, T. (2012) After Fukushima: Nuclear Power in a New World. Booz & Company, 18 pp.
http://www.strategyand.pwc.com/media/file/Strategyand_After-Fukushima-Nuclear-Power.pdf

ZOTH, G., & R. HAENEL. (1988) Thermal conductivity. En: **Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determinations**. HAENEL, L., RYBACH, L. AND STEGENA, L. Eds. 449-453 pp. Kluwer Academy, Norwell, Massachusests