



100 años de  
exploración  
geotérmica  
en Chile

# GEOTERMIA

La promesa del vapor



100 años de  
exploración  
geotérmica  
en Chile

# **GEOTERMIA**

**La promesa del vapor**

## CRÉDITOS

**ISBN:** 978-956-9130-60-1

**Propiedad Intelectual:** 2022-A-6031

**Coordinación de proyecto:** Fernanda González U.

**Concepción y redacción:** Claudio Betsalel A. y Mauricio Electorat M.

**Edición general:** Fernanda González U., Gonzalo Salamanca O. y Pamela Silva V.

**Dirección de arte y diseño:** Alejandra Lührs B., MUSEAL

**Gráficos:** Karin Piwonka B., MUSEAL

**Traducción informe E. Tocchi:** Mauricio Electorat M. y Gonzalo Salamanca O.

**Impresión:** Andros Ltda.

Distribución gratuita

Fundación ProCultura

Proyecto Acogido a Ley de donaciones culturales

Primera edición, Santiago, Chile, Abril 2022



## ÍNDICE

Prólogos		pg. 5
Glosario		pg. 8
Primera parte:		
La Humanidad y la Tierra		pg. 19
	I. Un italiano en el desierto	pg. 20
	II. Calor, agua y vapor	pg. 43
	III. El lugar donde estuvo el infierno	pg. 61
Segunda parte:		
De Larderello al mundo		pg. 81
	I. La posguerra: letargo en Chile y expansión mundial	pg. 82
	II. El renacer de un viejo sueño	pg. 93
	III. El regreso de Italia	pg. 101
Tercera parte:		
Una promesa cumplida		pg. 113
	I. Cerro Pabellón: un hallazgo inesperado	pg. 114
	II. Manos a la obra	pg. 125
	III. Geotermia y culturas: comunidades y territorios	pg. 141
	IV. El futuro	pg. 163
Agradecimientos		pg. 188
Traducción informe E. Tocchi		pg. 194
Bibliografía		pg. 208



Vista aérea de la planta geotermoelectrica de Cerro Pabellón (Ollagüe, Chile). Enel (Chile).

La publicación del libro “Geotermia, la promesa del Vapor”, en versión digital e impresa, constituye una invitación a compartir un viaje -iniciado hace más de un siglo- en busca de la energía geotérmica en Chile. Está dirigido no sólo a quienes se interesan en las ciencias de la tierra, que por cierto encontrarán antecedentes inéditos de la investigación precursora de este recurso, sino también pretende alcanzar una audiencia más amplia, en las aulas y fuera de ellas, entre quienes quieran indagar desde otras miradas esta travesía que ha sido pionera y ha trazado -de manera precursora- la senda de una nueva industria en Sudamérica. Es un relato entreverado de muchas voces, que acaban construyendo un prospecto cuyo primer boceto lo realiza un Ingeniero toscano, Ettore Tocchi, arribado al puerto de Antofagasta, en noviembre de 1921. Llega confiado en su conocimiento de una nueva tecnología que da sus primeros pasos fuera de Italia, y él es el encargado de ponerla en marcha en este país.

Este es un libro destinado a todos aquellos que quieran familiarizarse con la historia esquivada y tenaz de búsqueda en el desierto de Atacama de una de las fuentes de energía todavía poco conocida entre las renovables, a pesar de ser una de las más antiguas y nobles si atendemos a su permanente disponibilidad y diversidad de usos.

El viaje de la geotermia en esta parte del mundo ha sido intrincado y no exento de dificultades. Estos desafíos, que partieron de la localidad Toscana de Larderello, han sido superados por una posta de innumerables profesionales de todas las disciplinas y nacionalidades. Este relato recoge el testimonio de esas vidas, las primeras entregadas a la exploración, complementadas con la aventura profesional y vital de aquellos que como un corolario cumplieron la misión encomendada de construir una industria geotérmica en Chile.

**James Lee Stancampiano**  
Director de Argentina y Chile  
Enel Green Power y  
Thermal Generation

**Fabrizio Barderi**  
Gerente General  
Enel Chile

Cuando hablamos de patrimonio industrial en Chile es necesario comprender que éste es parte de nuestra identidad, de la comunidad en la cual está inserta y de nuestra historia.

Conocer su origen, sus anécdotas, procesos y desafíos, además de sus aspectos técnicos, nos permite comprender no solo el producto o servicio que otorgan al país, sino que también, reconocer a su comunidad, a sus profesionales y ponerlos en valor como parte de nuestra biografía y reconocer el impacto que ha tenido en el desarrollo económico y social del país.

Al cumplirse 100 años de las primeras exploraciones de energía geotérmica en Chile, este libro viene a celebrar y a entregar antecedentes inéditos en la historia de la geotermia a nivel mundial. Es un relato que se inicia en 1920 con la travesía del visionario Ettore Tocchi a bordo del vapor Orita y que llega hasta nuestros días.

La travesía de Tocchi dio origen a una de las plantas más innovadoras de energía en el país y en el mundo: fue la primera en Latinoamérica y la única en el mundo que se construyó a esa altura.

Al conocer su historia, su comunidad y sus últimos logros, nos damos cuenta de la relevancia que la generación eléctrica, a partir de la geotermia, tuvo y tiene para Chile; que en el camino delineado por Tocchi son muchos los que han contribuido a su éxito, y que el compromiso de todos ellos queda plasmado en las páginas de este libro que destaca y pone en valor la vinculación afectiva de quienes contaron sus historias, anécdotas y experiencias para la elaboración de este material. Esos relatos personales, íntimos, nos demuestran que el patrimonio industrial tiene un corazón que late fuerte en todos quienes, de una u otra forma, han sido parte de su desarrollo.

Quiero agradecer a Enel Chile, a la Biblioteca Nacional y a todo el equipo a cargo de este proyecto, quienes en plena pandemia, lograron sacar adelante esta publicación y reconstruir, a través de un relato lleno de humanidad, la historia y el valor de la geotermia en Chile. Esperamos que lo disfruten

Alberto Larraín S.  
Director Ejecutivo  
Fundación ProCultura



*Madre e hijos en Ollagüe.  
Enel (Chile).*

## **GLOSARIO**

### **Acuífero:**

Formación geológica que permite el almacenamiento y el desplazamiento o transmisión del agua por poros o grietas, proporcionando cantidades apreciables de agua para su explotación de una manera relativamente fácil y económica.

### **Aeromagnetismo:**

Se refiere a la medición del Campo Magnético Terrestre (CMT) con un sensor aerotransportado. El estudio del CMT puede entregar valiosa información sobre las propiedades magnéticas de las rocas de una determinada región, propiedades que a su vez tienen relación con la naturaleza de las rocas (tipo, composición mineralógica, etc.)

### **Alteración hidrotermal:**

Cambios físicos y químicos que afectan las rocas donde han circulado fluidos termales. Estos fluidos, generalmente a alta temperatura y de pH extremos, tienen la capacidad de disolver las rocas y/o precipitar nuevos minerales o elementos nativos. En el terreno, se pueden reconocer como manchas de variable extensión con coloraciones fuertes de tonos amarillos, blanco, rojo intenso u otros que en algunos casos dan origen a valiosos depósitos minerales.

### **Bofedal:**

Formaciones vegetales características de zonas de altura y que presentan saturación hídrica permanente en base a una red de cursos de agua corriente, generando el escenario propicio para el desarrollo de abundante fauna y vegetación adaptada a condiciones climáticas de altura.

### **Cementación:**

Operación para fundar las tuberías de revestimiento durante la construcción de un pozo. La cementación de revestimiento es considerada una de las operaciones más importantes del proceso de perforación, por ser el complemento necesario de las entubaciones para constituir la estructura de un pozo, que le otorga continuidad a las operaciones, y para asegurar la terminación correcta del pozo y garantizar su duración y funcionalidad en el tiempo.

### **Centro adventicio (o parásito):**

Centro de emisión de piroclastos y/o lava ubicado en el flanco de un volcán que se caracteriza por tener la misma fuente alimentadora de magma que el volcán.

### **Cinturón de Fuego del Pacífico:**

Zona que comprende los márgenes del Océano Pacífico, incluyendo toda la costa chilena, que se caracteriza por concentrar algunas de las

zonas de subducción más importantes del mundo, lo que ocasiona una intensa actividad sísmica y volcánica. El gran potencial que Chile posee para la generación de energía geotérmica y la explotación de recursos geotermiales en general, se debe a su ubicación privilegiada dentro de este rasgo geológico de escala global.

**Complejo volcánico:**

Conjunto de centros de emisión compuestos por diversas rocas volcánicas (domos, lavas y/o depósitos piroclásticos) que se caracterizan por una persistente actividad volcánica espacial, temporal y genéticamente relacionados.

**Concesión de exploración geotérmica:**

Procedimiento que faculta a toda persona natural chilena y a toda persona jurídica constituida de acuerdo a las leyes chilenas a solicitar una concesión de energía geotérmica y a participar en una licitación pública para el otorgamiento de tal concesión.

**Corteza:**

Corresponde a la capa más externa de la tierra (20 a 70 km de espesor) que constituyen las placas tectónicas. Es la parte superior de la litósfera que está separada del manto por la discontinuidad de Mohorovic y se divide en corteza continental y oceánica.

**Cráter:**

Depresión, abertura u orificio, usualmente circular, por donde son emitidos los piroclastos y/o la lava durante una erupción.

**Domo:**

Estructura volcánica circular a subcircular formada por la extrusión de lava viscosa acumulada sobre un centro de emisión. Comúnmente se forman al interior del cráter principal o en los flancos de grandes edificios volcánicos. Sus laderas son inestables y a menudo generan colapsos de roca.

**Energías Renovables No Convencionales (ERNC):**

En Chile se definen como aquellas fuentes de energías que en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil no se consumen ni se agotan en una escala humana. Entre estas fuentes de energía están la eólica, la pequeña hidroeléctrica (centrales de hasta 20 MW), la biomasa y el biogás, la geotermia, la solar y la mareomotriz.

**Entalpía:**

Cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno. En geotermia se definen los reservorios de baja y alta entalpía en función de la temperatura del fluido (menor que y mayor que 30 y 150° C, respectivamente).

**Electromagnetismo:**

Corresponde a una rama de la física que unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos, y que fue formulada por primera vez en forma completa por James Clerk Maxwell (ecuaciones de Maxwell). Es una de las cuatro “fuerzas fundamentales” del universo (junto a la gravitatoria y las interacciones nucleares “fuertes” y “débiles”).

**Estudios geológicos estructurales:**

Análisis de las diferentes deformaciones que afectan a las rocas como consecuencia de los esfuerzos tectónicos a las que son sometidas, dando origen a fallas y pliegues. En geotermia el estudio geológico-estructural es básico para la comprensión de la circulación y entrapamiento de los fluidos a través de las rocas.

**Estudios magneto-telúricos:**

Un método de exploración geofísica, de la familia de los métodos electro-magnéticos, que consiste en la medición conjunta del campo magnético terrestre (en un amplio rango de frecuencias) y del campo eléctrico asociado a las “corrientes telúricas” inducidas por dicho campo magnético. Esto permite determinar la resistividad eléctrica del subsuelo (rocas en profundidad), la que a su vez varía dependiendo de múltiples factores, como por ejemplo, la salinidad, mineralogía y presencia de fluidos.

**Erupción:**

Emisión de coladas de lava, gases y/o expulsión de piroclastos desde una fuente central o desde una fisura (o conjunto de fisuras). Esta puede ser tranquila a explosiva, lo que depende, principalmente, de la composición del magma, la cantidad de gases y vapor de agua presente.

**Exploración geotérmica:**

Reconocimiento y evaluación de un área con el fin de encontrar un reservorio con fluidos de alta temperatura. Se divide en dos etapas: superficial y profunda. La primera comprende estudios geológicos, hidrogeológicos, geoquímicos (manifestaciones termales) y geofísicos; la segunda comprende pozos profundos (1000 a 2000 metros).

**Exploración superficial:**

Reconocimiento y evaluación de las características superficiales y de subsuelo (a través de métodos indirectos) de un área para determinar la factibilidad de encontrar un sistema geotérmico. Para esto se realizan estudios de geología, geofísica y geoquímica de manifestaciones termales (manantiales termales, géiseres y fumarolas).

**Exploración del subsuelo:**

Métodos de exploración geofísica (por ejemplo MT) que consisten en la medición de un parámetro o conjunto de ellos que permiten interpretar las variaciones litológicas y estructurales que hay en profundidad.

**Explotación geotérmica:**

Obtención del recurso geotérmico, un fluido de alta temperatura, para utilizarlo con fines comerciales, como son la generación de energía eléctrica, calefacción de viviendas o instalaciones agrícolas.

**Falla:**

Superficie o plano de discontinuidad en la roca, a lo largo del cual se pierde la cohesión del material, presentando un desplazamiento medible como consecuencia de la aplicación de un stress de cizalle.

**Fractura:**

Superficie o plano de discontinuidad en la roca que se manifiesta a través de grietas causadas por la aplicación de una presión intensa. A diferencia de las fallas, en este caso no hay desplazamiento medible a lo largo del plano de fractura.

**Fuente termal  
(manifestación termal):**

Manifestación superficial de fluidos a temperaturas mayores que las esperadas para aguas naturales. Existen distintas manifestaciones termales tales como manantiales calientes, géiseres, fumarolas y pozas de barro, entre otras. Generalmente la composición química de estas manifestaciones evidencia características de los fluidos en el reservorio geotérmico y, a partir de ellas, se puede estimar la temperatura de los fluidos en profundidad.

**Fumarola:**

Emanación de gases y vapores a alta temperatura que surgen por fracturas desde la superficie de la tierra. Normalmente se asocian a actividad volcánica y/o geotermal.

**Géiser:**

Manifestación termal en forma de manantial de la que emana abrupta y periódicamente una columna de agua caliente y vapor.

**Geología:**

Ciencia que estudia la Tierra, los materiales de los que se compone (rocas y minerales), la estructura y disposición espacial de estos materiales, y los procesos (internos y superficiales) que los afectan a lo largo del tiempo. Esto último da paso al estudio de la evolución o historia geológica de una determinada área de estudio. El área de estudio puede abarcar desde un área pequeña de unos cuantos metros o kilómetros cuadrados, hasta una región o distrito de grandes dimensiones, incluyendo estudios a escala planetaria.

**Geocronología:**

Área del conocimiento que se encarga de determinar la edad absoluta de rocas, fósiles y sedimentos, utilizando para cada uno de estos materiales diferentes metodologías. Estas metodologías son variadas,

e incluyen por ejemplo técnicas químicas basadas en la radioactividad de ciertos isótopos químicos (datación radiométrica) o técnicas de luminiscencia, magnetoestratigrafía, etc.

### **Geofísica:**

Ciencia que estudia la Tierra desde el punto de vista de la física y su objeto de estudio comprende todos aquellos fenómenos relacionados con su estructura interna, condiciones físicas e historia evolutiva de la Tierra. Para su estudio utiliza métodos cuantitativos físicos como la sísmica de reflexión y refracción, y una serie de métodos basados en la medición de la gravedad, de campos electromagnéticos, magnéticos o eléctricos y de fenómenos radiactivos. En algunos casos, dichos métodos aprovechan campos o fenómenos naturales (gravedad, magnetismo terrestre, mareas, terremotos, etc.) y en otros son inducidos por el hombre (campos eléctricos y fenómenos sísmicos).

### **Geoquímica:**

Rama de la geociencia que utiliza herramientas y principios de la química para explicar los mecanismos involucrados en procesos geológicos que ocurren en la formación de rocas y fluidos. En la explotación geotérmica la geoquímica se utiliza para la caracterización e interpretación de procesos involucrados en la formación de las rocas, aguas y gases.

### **Geotermia (energía geotérmica):**

Palabra de origen griego, deriva de “geos” que quiere decir tierra, y de “thermos” que significa calor. Por lo tanto, geotermia se refiere a una rama de las geociencias que se dedica al estudio de las condiciones térmicas de un determinado lugar, la fuente del calor y las manifestaciones superficiales (por ejemplo fumarolas, géiseres o manantiales termales) que pueden ocurrir donde la temperatura y la tasa de aumento de la temperatura en profundidad (gradiente geotérmico) es mayor que en condiciones normales. La energía geotérmica se refiere tanto a la energía térmica aprovechable desde las zonas térmicamente anómalas de la superficie terrestre, como a la energía eléctrica que se puede generar en plantas geotérmicas a partir de los fluidos calientes presentes en la mayoría de los sistemas geotermiales.

### **Hidrología:**

Rama de la geociencia que estudia el recurso hídrico, su ocurrencia, circulación y distribución sobre y bajo la superficie terrestre.

### **Lava:**

Término que se aplica al magma cuando emerge a la superficie durante una erupción no explosiva desde un centro de emisión y fluye por gravedad. Corresponde a material incandescente (hasta 1.250°C) que forma flujos o coladas relativamente viscosas.

**Línea base:**

El concepto corresponde a la descripción de la situación actual, en la fecha del estudio, sin influencia de nuevas intervenciones antrópicas. En otras palabras, es la fotografía de la situación ambiental imperante, considerando todas las variables ambientales, en el momento que se ejecuta el estudio.

**Magma:**

Roca fundida a alta temperatura (700 – 1250°C), formada por una mezcla de líquido, gases y cristales que se genera en el manto y/o al interior de la corteza terrestre. Cuando emerge a la superficie da origen a procesos volcánicos.

**Manto:**

Una de las tres capas concéntricas que conforman la Tierra como resultado de las diferencias en la densidad entre las capas. Es función de las variaciones de composición, temperatura y presión. El manto comprende alrededor de un 83% del volumen de la Tierra y se ubica entre el núcleo y la corteza terrestre.

**Medio ambiente  
(o medioambiente):**

Conjunto de componentes físicos, químicos, biológicos y sociales capaces de causar efectos directos o indirectos, en un plazo corto o largo, sobre los seres vivos y las actividades humanas.

**Modelo geotérmico:**

Esquema conceptual que integra los estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos realizados en un área para determinar la posible existencia de un sistema geotérmico en profundidad. De existir, propone también una configuración de este indicando una fuente de calor, un reservorio con sus flujos entrantes y salientes de líquido o vapor e, idealmente, las interacciones de este con la hidrología superficial. Este modelo se va perfeccionando incluso en las etapas avanzadas de explotación.

**Núcleo interno de la Tierra:**

Se refiere a la parte más interior de la Tierra y que corresponde a una esfera sólida de un radio de 1.216 km situada en el centro de la Tierra. Está compuesta por una aleación de hierro y níquel y su densidad se estima en aproximadamente 14 gr/cm<sup>3</sup>. La profundidad de su límite superior (que lo separa del núcleo externo) es de aproximadamente 5.155 km bajo la superficie.

**Núcleo externo de la Tierra:**

Corresponde a la porción líquida de la esfera terrestre, situada entre la base del manto y el techo del núcleo interno, situada aproximadamente a 2.885 km bajo la superficie y con un espesor del orden de 2.270 km. La principal evidencia para postular que su estado es líquido se

basa en que las ondas sísmicas S (ondas de corte) no se propagan a través de esta parte del interior de la Tierra.

### **Petrografía:**

Rama de la geología que se ocupa del estudio de las características observables y medibles de las rocas y los minerales que las componen, es decir, sus aspectos descriptivos. Dentro de las características observables o visibles (cualitativas) se encuentran el color, brillo, forma, estructura, fábrica, sabor, olor y respuesta magnética. En tanto, las características medibles (cuantitativas) comprenden principalmente el tamaño y la dureza (en la escala de Mohs).

### **Piedra:**

Nombre popular que se le asigna a las rocas, especialmente en el ámbito de la construcción. Corresponde a un sólido formado por un conjunto de minerales, dependiendo de su origen se pueden clasificar en rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas.

### **Plataforma de perforación:**

Área definida en la perforación de un pozo que tiene como finalidad delimitar el sector de operaciones.

### **Placas tectónicas:**

Bloques rígidos de la litósfera que tienen movimiento relativo entre sí sin que ocurra deformación interna sobre la astenósfera de la Tierra. Este movimiento puede ser convergente (subducción o colisión), divergente (dorsales oceánicas) y transcurrente.

### **Planta geotérmica de vapor seco:**

Planta de energía geotérmica que utiliza sólo vapor para mover la turbina, lo que significa que a través de los pozos de explotación sólo sube vapor. Una vez que el vapor es utilizado, se convierte en agua para ser reenviado, mediante un pozo de reinyección, de vuelta al reservorio. Son escasos los reservorios de este tipo.

### **Planta geotérmica de condensación (“flasheo”):**

Planta construida a partir de reservorios geotérmicos con temperaturas de 170°C o más. Desde el pozo, la presión del agua caliente lleva a través de cañerías al “separador”, donde se reduce la presión. Luego que el vapor hace el trabajo de mover las turbinas, se condensa para nuevamente convertirlo en agua y devolverlo a través de un pozo de reinyección al reservorio geotérmico, para ser nuevamente calentado y reutilizado. La mayoría de las plantas de energía geotérmica en el mundo son de este tipo.

### **Planta geotérmica binaria:**

Muchos reservorios geotermiales contienen agua caliente, pero no lo suficiente para producir vapor y mover las turbinas. En estos casos el

agua del reservorio es usada para calentar un segundo líquido cuyo punto de ebullición es menor que el del agua (como por ejemplo, el alcohol), que al calentarse se expande y hace que la turbina se mueva. Como este es un circuito cerrado, el líquido secundario se mantiene en el intercambiador de calor y el fluido geotermal es devuelto al reservorio. Este tipo de tecnología tiene aplicaciones residenciales y urbanas por lo que se ha expandido su uso en el mundo.

### **Potencial energético:**

Medida de la cantidad de energía que se puede producir a partir de un recurso natural. Para calcularlo es necesario considerar las características particulares de cada proyecto en todas sus etapas y las externalidades que este genera. En el caso de las energías renovables no convencionales (ERNC), el recurso natural del que se extrae la energía sufre una intervención reducida o moderada y no es alterado de manera permanente. En el caso de un sistema geotérmico, el potencial se medirá en megawatts (MW), ya sea térmicos (en unidades de calor) o transformados en su equivalente eléctrico (como aporte a una red eléctrica).

### **Pozo:**

Perforación generalmente vertical realizada en la superficie de la Tierra con el objeto de búsqueda y explotación de minerales, agua subterránea o petróleo, entre otros. En el caso de la geotermia los pozos llegan a profundidades comúnmente superiores a los 1000 metros.

### **Pozo de gradiente:**

Perforación con carácter exploratorio que se hace en un punto específico de la tierra para medir la variación (gradiente) de temperatura a medida que aumenta la profundidad, con la finalidad de encontrar un sistema geotérmico.

### **Recurso renovable:**

Recurso energético que puede ser utilizado continuamente sin ser sobrexplotado, ya que se regenera asimismo dentro de una cantidad determinada de tiempo. Ejemplos de recursos renovables incluyen pequeñas hidroeléctricas, energía eólica y energía geotérmica.

### **Reservorio geotérmico:**

Zona del subsuelo (por lo general superior a 1.000 m de profundidad) compuesta por una secuencia de rocas calientes con cierto grado de porosidad y fracturamiento que le otorgan permeabilidad y que se encuentran saturadas en fluidos (agua y gases) a alta temperatura. El agua y vapor que proviene de estos reservorios son el recurso geotérmico para la generación de electricidad, entre otros usos.

### **Roca:**

Sólido compuesto por uno o más minerales, como producto de los procesos geológicos ocurrientes en el ciclo de las rocas. Existen tres grandes

grupos: (1) ígneas, producidas por enfriamiento y consolidación magmática al interior de la Tierra o procesos volcánicos externos; (2) sedimentarias, generadas a partir de la erosión y transporte de rocas pre-existentes, y la posterior litificación de los fragmentos (sedimentos); y (3) metamórficas, también producidas a partir de rocas pre-existentes, cuando éstas son sometidas a drásticos cambios de presión y temperatura.

### **Roca ígnea:**

Roca resultante del enfriamiento y consolidación de un magma. Pueden ser volcánicas o plutónicas, según que se consoliden en la superficie o en el interior de la corteza terrestre, respectivamente.

### **Salar:**

Lago superficial en cuyos sedimentos dominan las sales (cloruros, sulfatos, nitratos, boratos, etc.). Las sales se precipitan por la fuerte evaporación, que a largo plazo siempre es mayor que la alimentación o entrada de las aguas en la cuenca. Es el resultado de un largo proceso en el que se van acumulando las sales porque no drenan hacia el exterior (a los océanos a través de ríos), es decir, por el carácter hidrológicamente cerrado del lago (endorreico), proceso generalmente unido a la presencia de un clima árido con altas tasas de evaporación.

### **SERNAGEOMIN:**

Acrónimo de Servicio Nacional de Geología y Minería. Organismo público de Chile, dependiente del Ministerio de Minería. En el ámbito minero, es encargado de regular y fomentar la actividad en el país, así como de asesorar al Estado respecto a la propiedad minera y catastrar la actividad, elaborando las estadísticas mineras nacionales. En el ámbito geológico (y geofísico) tiene la principal misión de contribuir al conocimiento geológico/geofísico del territorio nacional, el que puede ser aprovechado científicamente, gubernamentalmente (por ejemplo en la planificación territorial), o por parte de las empresas privadas vinculadas con las actividades industriales que dependen de la información geológica existente (minería, geotermia, hidrocarburos, etc.).

### **Sismología:**

Rama de la geofísica que se dedica al estudio de los terremotos y, en general, al estudio de la propagación de ondas sísmicas generadas tanto en el interior, como en la superficie de la tierra. Dentro de sus principales objetivos estarían la propagación misma de las ondas sísmicas (lo que entrega valiosa información del medio que atraviesan), el origen de los terremotos y el riesgo sísmico (prevención de posibles daños, normas de construcción, etc.).

### **Sondaje:**

Término utilizado como sinónimo de perforación en minería, petróleo, geotermia y geotecnia, y corresponde a la acción a través de medios mecánicos (máquina de sondaje) que tiene como finalidad construir un pozo. Para lograr este objetivo se debe extraer todo el material des-

truido dentro del agujero mediante la utilización de aire comprimido o agua. En el caso de sondajes de exploración pueden ser de: 1) diamantina (al perforar se extrae un testigo de roca) o 2) circulación reversa (se destruye absolutamente la roca y se extrae roca triturada).

### **Subducción:**

Proceso de convergencia de placas tectónicas que tienen un desplazamiento en la misma dirección pero en sentido contrario. De esta forma, la placa más densa y pesada se hunde bajo la menos densa y más liviana. En los ambientes de subducción se concentra gran parte de la actividad sísmica y de los volcanes continentales.

### **Terremoto:**

Movimiento súbito de tierra (sacudida) asociado a la liberación de energía elástica de deformación en forma de ondas sísmicas. La mayor acumulación de energía (como deformación progresiva de las rocas) se produce donde hay convergencia de placas tectónicas (ambiente de subducción). Se reconocen también terremotos (o sismos) asociados a la actividad volcánica aunque estos son, en general, de menor magnitud que aquellos de origen tectónico.

### **Vapor:**

Estado gaseoso que adoptan los fluidos por acción del calor. El vapor de agua es un gas que se obtiene por evaporación o ebullición del agua líquida o por sublimación del hielo.

### **Volcán (estratovolcán o volcán mixto):**

Edificio volcánico mayor formado por una alternancia de lavas y depósitos piroclásticos, construido por erupciones sucesivas desde un centro de emisión principal.

### **Vulcanología:**

Rama de las geociencias dedicada al estudio de los volcanes y a la comprensión de las causas, de los fenómenos y productos asociados.

*Géiser San Federico, en Larderello (Toscana, Italia).  
Colección Fabio Sartori.*



PRIMERA PARTE

# LA HUMANIDAD Y LA TIERRA



## UN ITALIANO EN EL DESIERTO

### De Toscana a Antofagasta

El 2 de noviembre de 1921 llegaba al puerto de Antofagasta el vapor Orita, el más grande de los trasatlánticos de la *Pacific Steam Navigation Company* (9250 toneladas), que hacía la ruta entre Liverpool y América del Sur. En él, probablemente en una de sus ciento sesenta y nueve cabinas de primera clase, venía Ettore Tocchi. Ingeniero electricista, como lo define *El Mercurio*, ex director de la Central Eléctrica de Larderello, en la Toscana, cerca de Volterra. El ingeniero Tocchi había podido familiarizarse con el castellano durante algo más de un mes, si contamos el viaje desde el norte de Italia hasta Liverpool, o La Rochelle, o Lisboa para ir a tomar el barco que lo traería al desierto chileno. Así lo declara él mismo al periodista de *El Mercurio* de Antofagasta, a quien concede una entrevista publicada al día siguiente de su llegada: “conocía poco del español, pero lo he practicado con frecuencia en el largo mes que llevo de navegación.” Hay que imaginarse el puerto de Antofagasta en 1921. Lo primero es que no había un verdadero muelle, no uno en todo caso donde pudiese atracar la verdadera ciudadela flotante que era el Orita, capaz de transportar más de mil pasajeros, de los que se ocupaba una tripulación de ciento setenta y dos personas. El ingeniero Tocchi abordó pues uno de los innumerables botes o lanchones que iban a buscar pasajeros y carga para traerlos a tierra firme.

*Bahía de Antofagasta, 1920.  
Colección Museo Histórico Nacional, Chile.*

### ANTOFAGASTA—Movimiento en la Bahía





## La ilusión de un futuro esplendoroso

Lo primero que llama la atención no es lo que dice Tocchi –que ya es importante, como veremos, y mucho– sino lo que dice el periodista. Por la sencilla razón de que nos ofrece probablemente la única descripción física –al menos en castellano y en la prensa escrita–, casi una semblanza, diríamos, del hombre que estará al inicio de la geotermia en Chile:

*“Le observamos. Tiene un tipo muy semejante a los antiguos hidalgos castellanos: alto, de cuerpo bien conformado, frente amplia, rostro sereno, ojos claros que apenas velan un par de finos lentes. El óvalo de la cara termina suavemente en una alba pera, que le da al conjunto un aspecto venerable y marcial, que infunde respeto.*

*Sin embargo, desde las primeras frases, desde que uno siente las primeras inflexiones tan peculiares de su idioma, su persona va cautivando lentamente, hasta inspirar la más absoluta confianza.*

*Como italiano de pura cepa, a toda palabra la acompaña con la acción; sus ojos, a través de los lentes, se avivan, transmitiendo al oyente cuanto quieren decir; sus manos dibujan en el aire piques profundos o diseñan inmensos golpes de agua, de los “geyseres” de Islandia o de Nueva Zelanda o de Johnstone, en Estados Unidos...*

*El Gran Hotel Londres (izquierda) en la calle Prat, donde Tocchi se hospedó durante su estadía en Antofagasta. Tarjeta postal de la época. Colección Biblioteca Nacional de Chile.*

*En fin, no nos cabe duda que nos hallamos delante de toda una personalidad que sabe decir lo que quiere que se le entienda, con la doble facultad de la palabra y de la acción.”*





*Plaza Colón de Antofagasta, hacia 1920.  
Colección Biblioteca Nacional de Chile.*



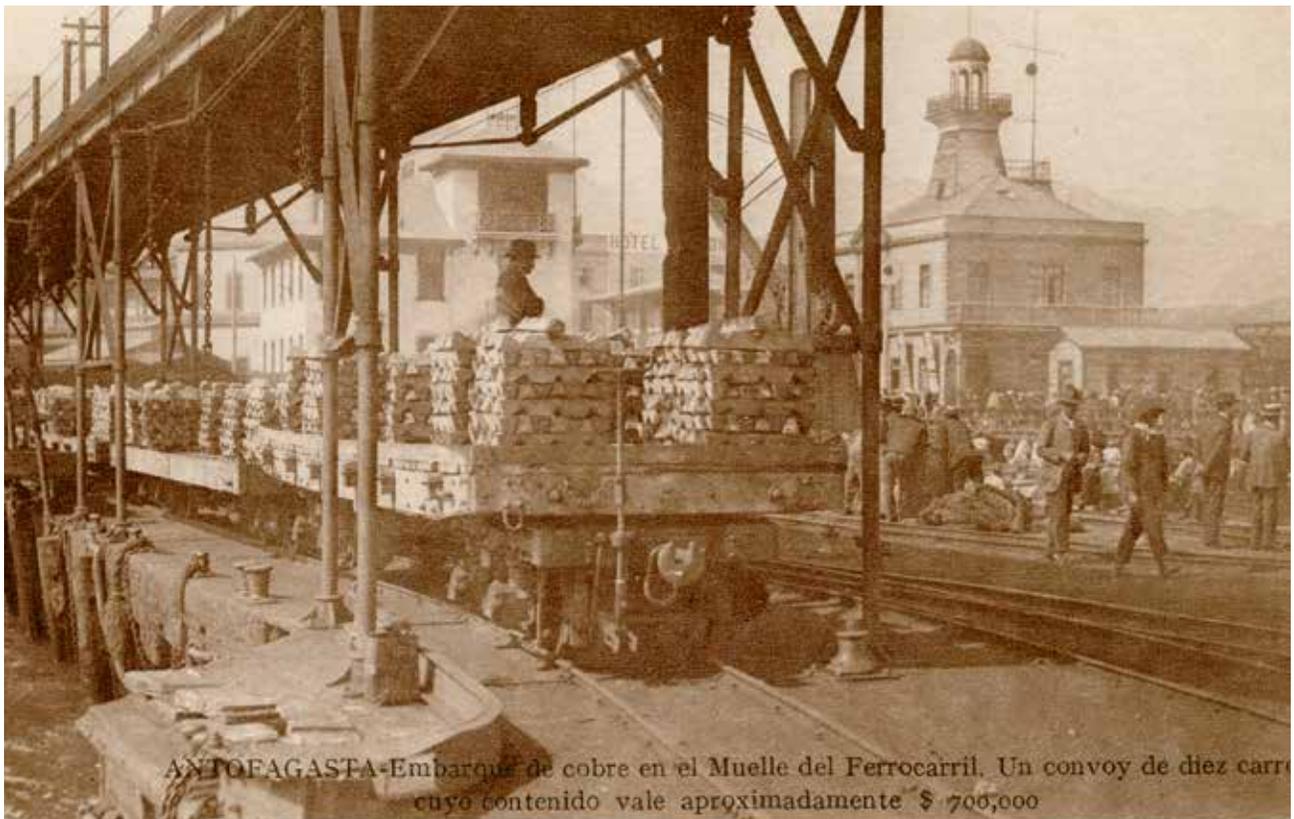
*Malecón y muelle del ferrocarril del puerto de Antofagasta en las primeras décadas del siglo XX.  
Colección Biblioteca Nacional de Chile.*

La doble facultad de la palabra y de la acción... Tiene toda la razón el periodista, aunque mucho más allá de una forma de expresarse propia de los hombres y mujeres de Italia, esta conjunción entre palabra y acción será precisamente lo que va a caracterizar la estadía –pero uno podría escribir también la “aventura” y hasta la “epopeya”– de Ettore Tocchi en Chile. Pero respondamos de una vez a la pregunta elemental: ¿a qué viene el ingeniero italiano a Chile? La respuesta la encontramos en la misma entrevista:

*“Sin gran ruido, en forma discreta pero decidida y firme, hace algún tiempo se organizó en Antofagasta una de las muchas sociedades que han venido saliendo a la luz pública en estos últimos años y cuya finalidad, como la de la mayoría de ellas, no tiene otro objeto que el aprovechamiento de las riquezas naturales con que la Madre Naturaleza ha dotado a nuestro suelo.*

*Pero hemos de establecer una diferencia esencial entre las demás y la que nos ocupa. Y es que la Comunidad Preliminar de El Tatio, tal es su nombre, difiere sustancialmente de las otras no sólo por la forma de su organización, sino por su objeto, cual es el del aprovechamiento, como fuerza motriz, de los “soffiones” derivados del volcán Tatio, situado en los contrafuertes de la cordillera al interior de San Pedro de Atacama. Los estudios de esta Sociedad llegaron hasta un punto en que se hizo indispensable la intervención de la ciencia, personificada en un especialista que viniera a decir la última palabra sobre la materia.*

*Embarque de cobre en Antofagasta, alrededor de 1920. Tarjeta postal de la época. Colección Biblioteca Nacional de Chile*



ANTOFAGASTA-Embarque de cobre en el Muelle del Ferrocarril. Un convoy de diez carruajes cuyo contenido vale aproximadamente \$ 700,000



*Ettore Tocchi y Marie Curie ante el Palacio de Larderel (1918). Museo de la Geotermia de Larderello (Italia)*

*Y el especialista ya lo tenemos acá. Se trata del ingeniero electricista de reputación mundial, “signore” Ettore Tocchi. Él podrá decir si es o no posible el aprovechamiento de las enormes fuerzas que encierran las entrañas de la tierra y cuyas manifestaciones llegan a la superficie en forma de caprichosos vapores.”*

Preguntado por la posibilidad de utilizar el vapor almacenado bajo la tierra para generar electricidad en la región, Tocchi responde:

*“Por los estudios que he hecho, basados en los datos que se me mandaron a Italia, puedo casi asegurar que se trata de “soffiones” sino idénticos, muy parecidos a los de Larderello. Si logramos establecer la identidad, la potencia y extensión de las corrientes que producen la fuerza de esos vapores, puedo asegurar que esto generará una riqueza colosal, pues la fuerza motriz que se generará será suficiente para producir luz y asegurar el movimiento de todas las máquinas de todas las salitreras e industrias, los ferrocarriles, los hornos metalúrgicos y las fábricas en general.”*

El periodista remata la entrevista transformando el razonable optimismo del ingeniero italiano en un verdadero ditirambo sobre el magnífico futuro que espera a la región y al país. Es bueno tenerlo en cuenta porque se trata sin duda de la expresión de una percepción compartida en esos años: una fe ciega en el futuro, que acaso sea también –y a lo mejor sobre todo– una manera de rehuir las múltiples señales que en 1921 indican que, por el contrario, la decadencia de la industria del salitre ha comenzado y no se detendrá.

*“Es fuerza, pues, creer que esta región de Chile está predestinada a vivir un futuro esplendoroso, pues los mantos de mármoles, sus campos inmensos que esperan sólo la semilla para producir una floreciente agricultura, las seguridades de la existencia de grandes yacimientos de petróleo, los cerros enteros de sal gema que existen en los alrededores de la línea Augusta Victoria, en la frontera con Argentina, sin tomar en cuenta el inmenso territorio calichero, las minas de oro y cobre ya en explotación, todo, todo, nos hace vislumbrar un risueño porvenir.”*

Por su parte, en una entrevista que el diario ABC de Antofagasta publica el 20 de noviembre de 1921, Ettore Tocchi declara:

*“Existe posibilidad para el negocio, pero no sabré su cuantía, ni el poder de energía que se podría obtener hasta haber terminado los estudios.”*

La idea de abastecer de energía barata toda la industria minera de Atacama y las industrias conexas (ferrocarriles, hornos metalúrgicos) no es un invento alojado en la imaginación de Ettore Tocchi, sino un anhelo de los industriales del norte de Chile y, en particular, de los capitalistas que están detrás de la industria salitrera. Y en esa exploración de las posibilidades del vapor –en particular el que se manifiesta en los géiseres de El Tatio– los italianos asentados en Atacama desempeñan un papel no menor. De hecho, la creación de la Sociedad Preliminar de El Tatio es, en buena medida, una iniciativa italiana.

## **La Sociedad Preliminar de El Tatio**

En 1917 llega a Antofagasta el italiano Giovanni Severina. Viene en calidad de representante de la empresa Franco Tosi Legnano, que vende maquinaria para la industria salitrera. No mucho después, Tosi Legnano le señala a su representante en Chile el interés de la empresa por los géiseres de El Tatio y le solicita que visite el lugar. Pero no le envía los recursos necesarios para montar una expedición. Estamos en 1917 y al Tatio no se llega tan fácilmente, porque además se trata de organizar una expedición de carácter científico que pueda determinar, en base a estudios y exploración en el terreno, las posibilidades de instalar allí la primera planta geotermoeléctrica del país.

Giovanni Severina se asocia entonces con tres comerciantes antofagastinos, de apellidos Capillo, Ivanovic y Vázquez y crean la Sociedad Preliminar de El Tatio. La Sociedad emite acciones para obtener capital y contactan al ingeniero Plinio Bringhenti, en Milán. Bringhenti decide rechazar la oferta de venir a Chile, pero recomienda a su colega Ettore Tocchi, que acaba de dejar la dirección de la central geotermoeléctrica de Larderello.

Así es como el ingeniero Tocchi se encuentra en el Gran Hotel Londres de Antofagasta el 2 de noviembre de 1921.

## El salitre, un sueño que se esfuma

Hablemos un poco del contexto histórico de ese año 1921 en el desierto de Atacama. Lo primero que hay que tener en cuenta es que hacia fines del siglo XIX y durante el primer decenio del XX se produce el auge salitrero en el Norte de Chile y muy especialmente en la provincia de Antofagasta, que originalmente pertenecía a Bolivia (era el llamado Departamento del Litoral) y fue incorporada al territorio nacional tras la Guerra del Pacífico (1879-1884), que enfrentó a Chile con Perú y Bolivia. Tras la incorporación de este enorme territorio a Chile, la industria del salitre conoce un vertiginoso desarrollo, gracias, entre otras cosas, a la construcción de una vasta red de ferrocarriles que conectaban a las cuarenta y cinco “oficinas salitreras” del interior con los puertos. Así, por ejemplo, en 1900 se inaugura la vía férrea entre Antofagasta y Coloso. Y en 1902, la que une a este último puerto con el pueblo de Yungay. Coloso se transforma entonces en un importante puerto salitrero. En 1907, por ejemplo, más de 300 naves habían recalado en su bahía. Contaba con cancha de tenis, de fútbol, cine y la carretera entre Coloso y Antofagasta era la vía más transitada de la provincia, con más de 100 vehículos motorizados al día, según estadísticas de la época. Otro tanto ocurre en la oficina de Pampa Unión, que tuvo más de quince mil habitantes, juzgado de policía local, tres periódicos, y lo mismo sucede en el puerto de Taltal, que contaba con once mil quinientos habitantes en 1907 y más de cincuenta casas comerciales, entre las cuales once sastrerías, además de cine, tres periódicos en inglés y representación consular de España, Francia, Alemania, Inglaterra, Suecia, Italia, Argentina y Perú.

*Géiser en el campo geotérmico del Tatio.  
Marcela Mella.*



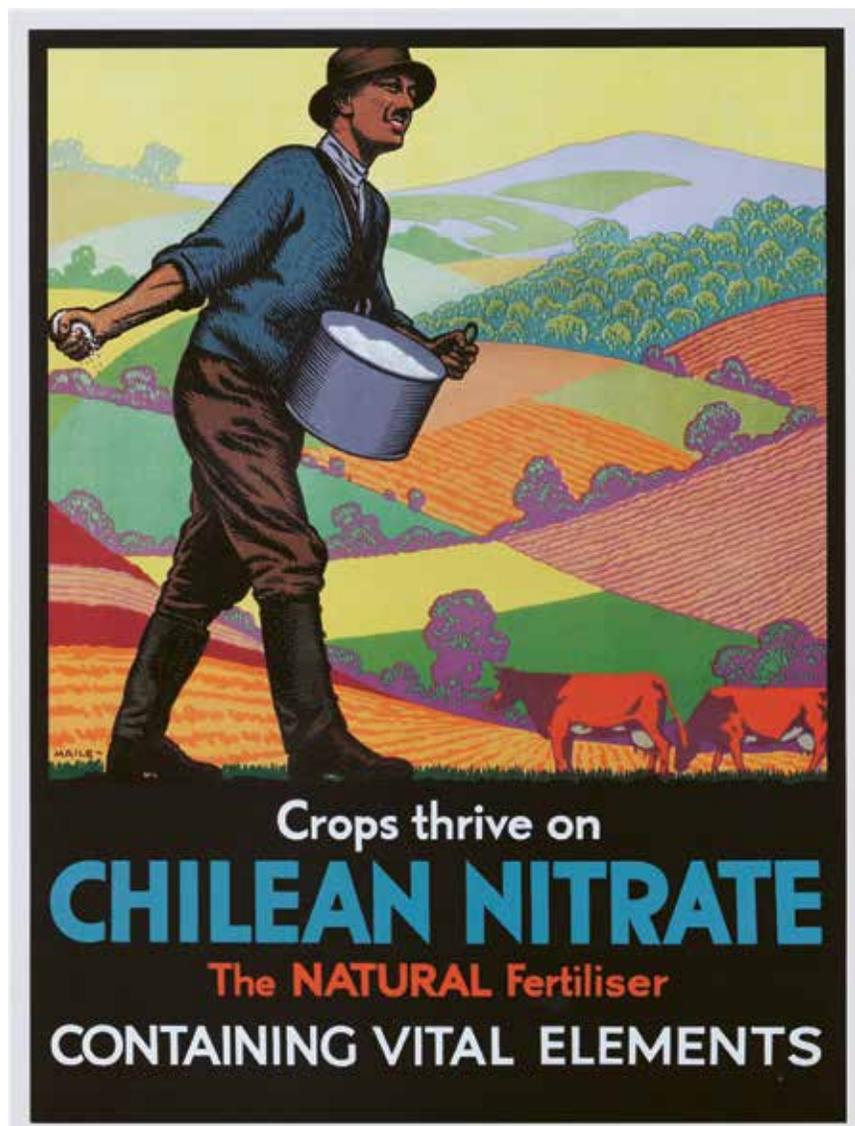


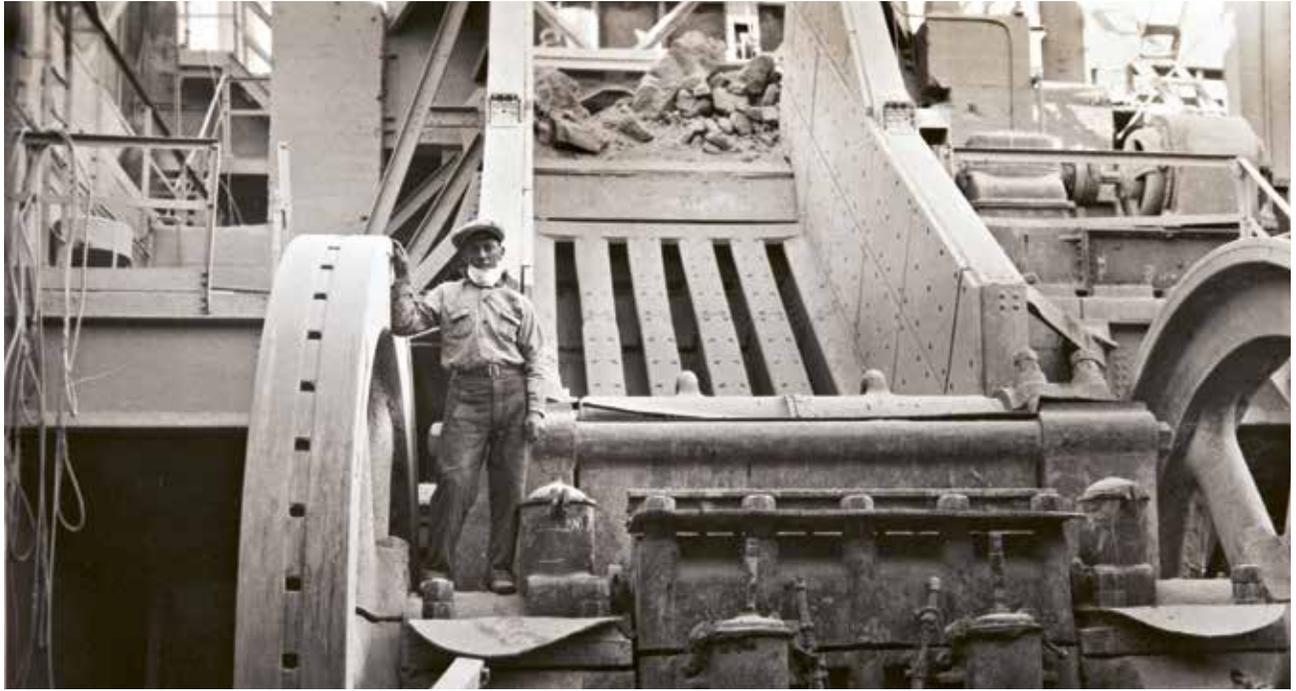
*Trabajadores al interior de faenas salitreras, hacia 1900. Colección Museo Histórico Nacional (Chile)*

Pero en 1921 habían ocurrido al menos un par de acontecimientos que van a echar por tierra el sueño de ese “futuro esplendoroso” del que habla el periodista antofagastino. El gran cataclismo de la Primera Guerra Mundial, para comenzar, va a tener una incidencia directa sobre la industria del salitre. Durante la guerra, este mineral es imprescindible, pero una vez finalizada, los países europeos necesitan mucho menos salitre que en los años anteriores. Hacia fines de la primera década del siglo, las bodegas de las oficinas del Norte Grande y las de las industrias de los países consumidores estaban atiborradas de salitre. Se produce, pues, una radical contracción de la demanda. Pero además, porque nunca una desgracia llega sola –sobre todo cuando no se ha podido, ni querido, aprovechar la fuerte acumulación de capital que genera el salitre para la diversificación de la industria nacional–, durante la guerra el químico alemán Fritz Haber desarrolla el salitre sintético. Dicho desarrollo tiene lugar luego de que entre 1908 y 1913, el también químico Carl Bosch hubiera desarrollado el proceso de síntesis del amoníaco a partir de hidrógeno y nitrógeno sometidos a altas presiones. Esto supone un duro golpe para la industria salitrera nacional, que se ve obligada a disminuir drásticamente su producción. Para la

década de 1920, de las cuarenta y cinco oficinas salitreras de la región de Antofagasta, treinta y cinco habían paralizado sus faenas, dos trabajan a medio rendimiento, otras dos a un ritmo aún menor y sólo seis seguían funcionando a pleno régimen. En 1916, Chile exportaba tres millones de toneladas métricas de salitre. En 1919 esa cifra cae a un poco menos de un millón, según se lee en “El fin del ciclo de la expansión del salitre: la inflexión de 1919 como crisis estructural”, de Sergio Gonzalez, Renato Calderón y Pablo Artaza. Esto produce, como es de esperar, un éxodo de grandes masas de trabajadores desde las oficinas a los puertos y, desde allí, al sur del país, con su consiguiente estela de miseria e inestabilidad social y política. Pero hay que decir que esta miseria ya se producía en pleno auge de la industria, porque los dueños de las salitreras –de capitales fundamentalmente ingleses y chilenos– ponían topes a la producción del mineral, asignándole cuotas a cada oficina, de manera a generar escasez y hacer crecer la demanda y el precio en los mercados internacionales. Esta práctica fraudulenta, de colusión o cártel, conocida en la época como las “combinaciones salitreras”, suponía cierta-

*Afiche publicitario del salitre chileno en Gran Bretaña e Irlanda (1900). Colección de la Biblioteca Nacional de Chile.*





*Operario de chancador primario de grandes proporciones. Oficina María Elena, ca. 1930.*

mente un incremento de los beneficios para los detentores del capital, pero acarrea resultados dramáticos para los obreros que quedaban sin trabajo de un día para otro. “Entre 1884 y 1913 –escribe Juan Floreal Recabarren– se organizaron cinco, con resultados catastróficos: 1884, 1891, 1896, 1901 y 1909.” Tanto así que el diario antofagastino *El Industrial* da cuenta, en su edición del 9 de enero de 1896, de un informe de la Delegación Salitrera al Ministerio de Hacienda en que se lee: “Las supresiones de empleo de las oficinas han dejado una gran cantidad de operarios sin trabajo en la pampa, número que calculo en tres mil, lo que representa más o menos seis mil personas que no tienen de qué vivir.”

Ese era el Chile de “risueño porvenir” al que llegaba Ettore Tocchi.

## **El Informe Tocchi**

Poco es lo que sabemos del paso de Ettore Tocchi por Chile y de las condiciones de su estadía en El Tatio. Juan Floreal Recabarren, en sus *Episodios de la vida regional*, afirma que para apoyar la expedición del ingeniero, la Sociedad Preliminar financió la construcción de un camino desde la estación San Pedro (en el ramal que unía Antofagasta con Bolivia) hasta Linzor, a dos horas de camino de El Tatio. Nos informa también que se adquirió un automóvil Ford para transportar los instrumentos de medición y se construyó una casa en El Tatio. Para asegurar los trabajos de exploración se compraron doce pertenencias mineras. Se nos dice por último que los empresarios comprometidos en la aventura, Luis Lacalle, Nemesio Vásquez, Antonio Luksic, Alfredo Cousiño y Aliro Parga, realizaron una inversión superior a los cuatrocientos mil pesos, una suma considerable para la época.

# LARDERELLO

S. p. A.

UFFICIO GEOLOGICO

Ing. E. TOCCHI

I L T A T I O  
.....

*El Mercurio* de Antofagasta, en su edición del viernes 16 de diciembre de 1921, da cuenta de una reunión de la Junta General de Accionistas de la Sociedad Preliminar de El Tatio:

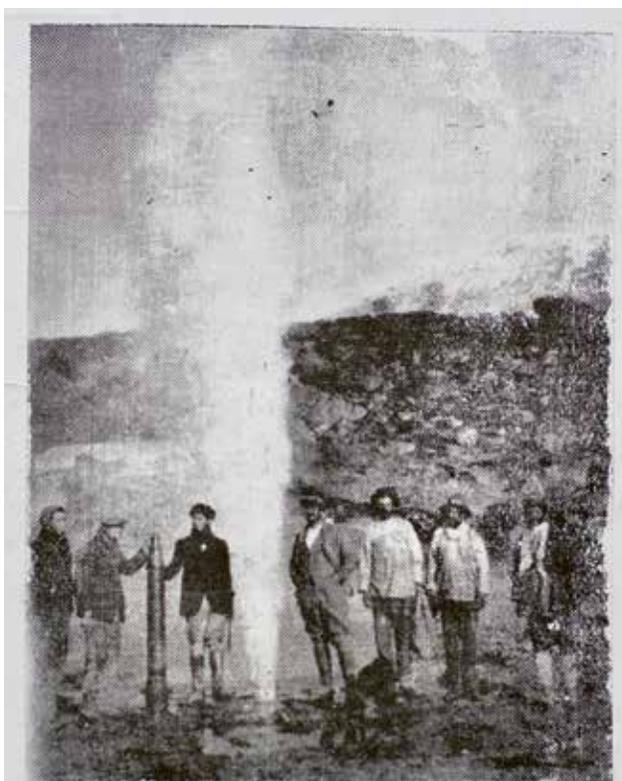
*“Días atrás, los accionistas de la sociedad nombrada se reunieron en Junta General, bajo la conducción de su Presidente, don José J. Granada y su Secretario, don Nemesio Vásquez Cisternas.*

*El Secretario dio lectura al acta de la sesión de Directorio verificada el 24 del presente mes de noviembre en curso, en la que se contiene la relación o exposición hecha por el ingeniero, señor Tocchi, de su primer viaje de exploración y constatación al terreno de la Sociedad y los acuerdos tomados por el Directorio para la prosecución de los trabajos propuestos por el ingeniero, cobranza de la segunda cuota y aprobación de las transferencias de acciones liberadas.*

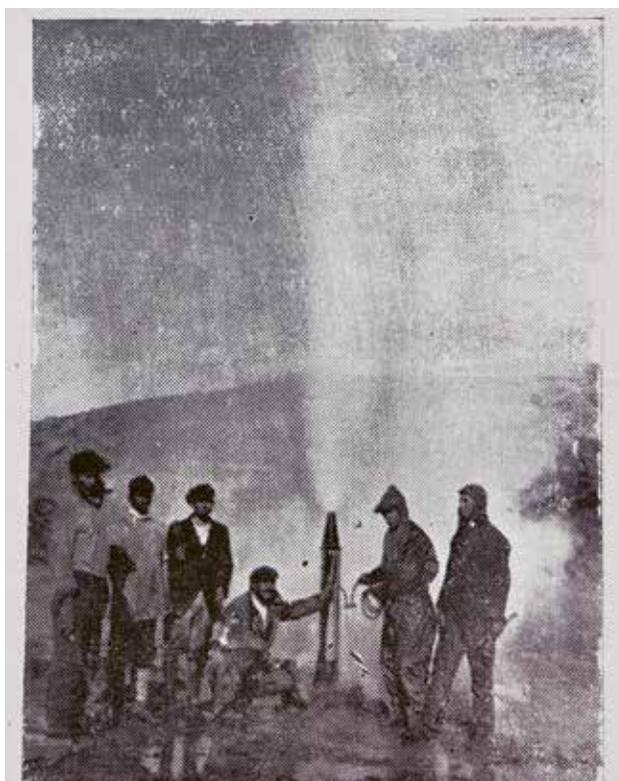
*Ofrecida la palabra al Sr. Tocchi, hizo éste una breve exposición del resultado de su viaje, más o menos en los mismos términos en que se dirigió al Directorio y agregando varios detalles que le fueron solicitados por el accionista don Alfredo Cousiño.*

*Tocchi y sus asistentes instalan un “aparato medidor de vapor” en el géiser 18 de Septiembre. El Tatio, 1922. “Álbum de Tarapacá y Antofagasta” (1924). Colección Privada Cesare Coronata Zunino.*

*Actualmente se espera la llegada de las máquinas especiales que se han encargado a Italia y que ya vienen en viaje. Además, se traerán perforadoras y técnicos especializados en el ramo.”*



**El soffione “18 de Septiembre” antes de la colocación del medidor de vapor**



**El soffione “18 de Septiembre” con el aparato medidor de vapor colocado**

Eso quiere decir que Ettore Tocchi hizo una primera visita a El Tatio que debe haber tenido lugar entre el 3 y el 23 de noviembre de 1921, puesto que llegó el 2 de ese mes a Antofagasta y el 24 estuvo presente en la Junta de Accionistas de la sociedad mandante.

Es presumible pensar entonces que Ettore Tocchi se haya vuelto a instalar en El Tatio a partir de mediados de diciembre de 1921, para llevar a buen puerto la misión de estudiar el poder de energía que parecen señalar los géiseres y determinar si es posible crear allí la primera planta geotermoeléctrica del país.

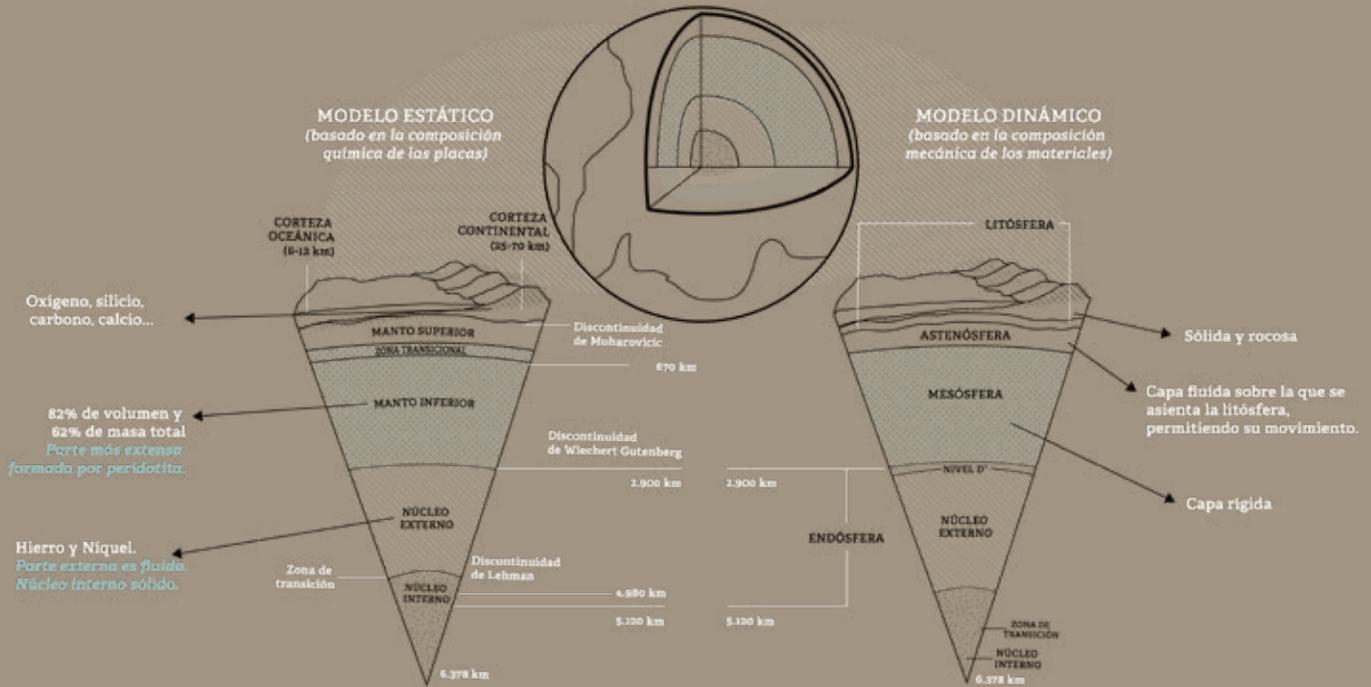
Hay un solo documento que nos permite conocer algo más de los trabajos de Tocchi en el altiplano, pero es de suma importancia. Se trata del Informe que el propio ingeniero redacta, dando cuenta de su misión. Está fechado en Castiglioncello, en enero de 1923. Y en él leemos que dejó El Tatio el 23 de septiembre de 1922. Su estadía en la pampa chilena habría durado, pues, alrededor de diez meses. ¿Quién lo acompañaba? En su escrito se refiere en varias ocasiones a los indios, cuya compañía debe haber sido importante y no sólo para obtener informaciones sobre elementos cruciales de la cultura altiplánica. Sabemos que el perforista que llegó más tarde de Italia se llamaba Antonio Cavialini. ¿Habría sido su cómplice, Cavialini, en los días de ardua labor, a más de cuatro mil metros de altura, y en las frías noches del Altiplano? ¿Qué otros técnicos venidos de Italia lo acompañaron?

El informe, titulado *El Tatio*, lleva el membrete “Larderello S.p.A – Ufficio Geologico”, consta de más de treinta páginas y se divide en siete apartados, además de la introducción: Posición geográfica, Vías de acceso, Topografía y geología, Clima, Estudio sobre el vapor, Labores de exploración y Estimación de la energía disponible.

*Título accionario de la  
Comunidad Preliminar del Tatio.  
Colección Privada  
Cesare Coronata Zunino.*



# ESTRUCTURA DE LA TIERRA: DOS MODELOS



Desde la época en que Ettore Tocchi realizó su memorable expedición a las alturas del campo geotérmico de El Tatio, la representación de la estructura de la Tierra ha evolucionado enormemente. Hoy en día, ésta se describe alternativamente por la composición química de sus capas (modelo estático) o por las propiedades mecánicas de sus materiales (modelo dinámico).

Según el primer y más clásico modelo, la estructura de la Tierra está compuesta por corteza, manto superior, manto inferior, núcleo externo y núcleo interno. El segundo modelo define los componentes de litósfera, astenósfera, manto mesosférico (o mesósfera), núcleo externo y núcleo interno.



*Arriba: Campamento de Ettore Tocchi en El Tatio hacia 1922. Archivo Histórico de Enel (Italia).  
Abajo: Ruinas del mismo campamento en la actualidad. Marcela Mella.*

Resulta extraño que el Informe de Ettore Tocchi no haya sido, hasta ahora, rescatado y difundido como uno de los textos científicos importantes de la historia de la ciencia en Chile. Aunque escrito en y por un italiano, no es arriesgado aventurar que se trata de uno de los estudios más completos sobre las posibilidades del vapor para la generación de electricidad en la cordillera de los Andes del norte chileno. En todo caso, Ettore Tocchi es el primero en su época en abordar –con un estilo literario, refinado, que hace muy agradable su lectura– la descripción de la llamada entonces Puna de Atacama, de manera pormenorizada, desde diferentes puntos de vista: geográfico, geológico, hidrológico, geoquímico, mineralógico, climático y, en hacer, desde luego, una evaluación de las posibilidades económicas y hasta políticas de la geotermia en el norte de Chile.

Como el Informe Tocchi es la piedra angular del desarrollo de la geotermia en el país, nos ha parecido inevitable rescatarlo en este libro. De esta manera, los lectores podrán consultar, por primera vez, el documento que abre la vía a la geotermia en Chile. Y aunque resulta imposible dar cuenta aquí de la complejidad de los análisis del inge-

niero, veamos algunos de sus aspectos esenciales. Sobre las riquezas minerales de la región, por ejemplo, escribe:

*“La Puna de Atacama ... que hoy en día puede estimarse carente de cualquier vía de comunicación practicable, encierra una vasta y apenas conocida riqueza mineral. La Sal Gema, excepcionalmente pura y abundante, recubre el lecho seco de un antiguo mar (el Salar de Atacama). El bórax, el carbonato de sodio, el yeso, el azufre, el cobre en estado puro, la plata y a lo mejor el petróleo y los esquistos bituminosos... Sin ningún régimen de irrigación a causa de los escasísimos cursos de agua superficiales, el suelo se ha vuelto estéril en vastísimas extensiones, mas no deja de ser fertilísimo apenas puede ser irrigado, como lo demuestran sin excepción las pocas localidades en las que afortunadas circunstancias geológicas permiten a las aguas, que por otra parte deben discurrir abundantemente en profundidad, aflorar. Estas localidades son riquísimas en pastos y frutos de todo tipo y gozan de un clima delicioso, producto de la combinación de efectos opuestos entre la baja latitud (23-24 grados) y la notable altitud, constantemente superior a los 2000 metros.”*

Y refiriéndose a las posibilidades de una energía masivamente al alcance de todas las actividades productivas de la región, agrega:

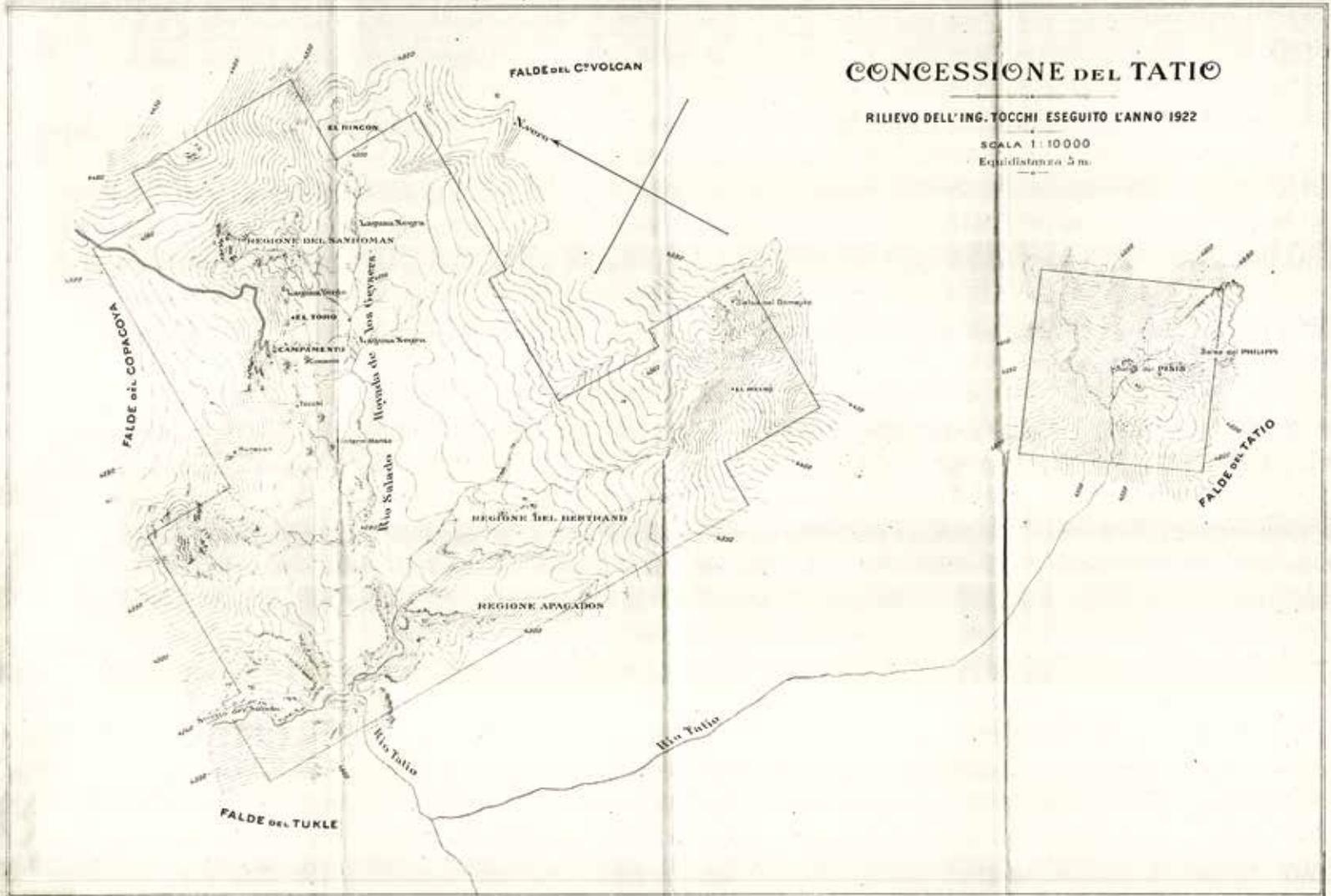
*“La fuerza motriz abundante, puesta a disposición de la agricultura y de la minería, además de la conexión con la costa asegurada por las vías férreas, produciría una maravillosa transformación de las condiciones de este rico territorio aún por valorizar, pero desgraciadamente es justamente esa fuerza motriz, junto con el agua demasiado escasa las que serán siempre difíciles de proveer, a menos que se tenga la osadía de utilizar convenientemente otras energías, entre las cuales la geotérmica.”*

En particular, en cuanto a los beneficios para la industria del salitre, su diagnóstico es claro:

*“Los establecimientos de la Pampa Salitrera queman no menos de 300.000 toneladas de petróleo al año y a este petróleo, que ya es caro en el momento de su desembarco, hay que agregarle los costos de transporte ferroviario a tarifas notablemente elevadas.”*

Estamos, recordémoslo, en 1921. Lo que propone Tocchi, si hubiese resultado, más que una “maravillosa transformación” hubiese sido una verdadera revolución, la posibilidad de una verdadera modernización industrial –y, por lo tanto, capitalista– que en Chile no se produjo. Ahora, él mismo ve las limitaciones y las dificultades para llevar adelante un proyecto de tal magnitud, entre las cuales se cuenta la actitud de los capitalistas chilenos, incapaces de ver los alcances profundos de esa “maravillosa transformación” si llegara a darse:

*“Enfrente, y en contraste con este prometedor panorama de la riqueza aún por explotar de este verdadero, grandioso despliegue de la natura-*



Antiguo mapa de la concesión geotérmica del Tatio.  
 Archivo Histórico de Enel (Italia)

*leza, tenemos la indiferencia de los capitalistas chilenos por los asuntos del Norte que no sean, como hasta ahora, negocios relacionados con el salitre, además de la falta de carreteras (1 km apenas por cada 40 km), junto con la falta podemos decir absoluta de agua y la carencia de fuerza motriz.”*

Hay aquí una crítica directa a los empresarios de la época que no se interesan sino por los beneficios a corto plazo. Visionario, Tocchi, porque apunta a un problema que lastrará el desarrollo del país durante muchísimas décadas. Y esto lo dice a pesar de que son capitalistas nacionales quienes lo traen a hacer su estudio. ¿Veía Tocchi más lejos –e incluso mucho más lejos– que sus comanditarios?

Como quiera que sea, termina su introducción insistiendo en el potencial de la energía geotérmica y su capacidad transformadora de la economía de la región:

*“Creo que este rápido examen será suficiente para justificar la esperanza de que los trabajos de exploración que felizmente iniciara en El Tatio confirmen la posibilidad práctica de hacer realidad la construcción de una potente central eléctrica geotérmica, cuya energía, distribuida a los usuarios de la minería, de las oficinas de la Pampa Salitrera y de la lejana Ciudad, contribuya a la valorización de los grandes y no siempre conocidos recursos y riquezas naturales de la región de Antofagasta.”*

Y el ingeniero cierra su informe con una estimación mucho más precisa:

*“Habiéndome ocurrido, en otras ocasiones, de tener que traducir en cifras, al uso de personas de negocios, mis impresiones sobre El Tatio, hablé de la posibilidad de instalar allí una central de 50 000 kw, considerando, como considero aún en base a los aspectos mencionados en este escrito, que tal potencia podría ser perfectamente alcanzable, a condición de que la continuación de los tan bien iniciados trabajos de sondaje confirmen la posibilidad práctica de obtener el vapor en las deseadas condiciones de temperatura y composición química.”*

*Ettore Tocchi observa la actividad geotérmica en El Tatio (hacia 1922).  
Archivo Histórico de Enel (Italia)*



## ¡No va más!... Pero va

A pesar de las posibilidades que establecen los trabajos de Ettore Tocchi y que él detalla animado de una discreta esperanza en su Informe, en 1925, cuando la crisis de la industria salitrera es ya una realidad irreversible, todo se derrumba. Ese año, el ingeniero Domingo Monaguillo declara ante el Directorio de la Sociedad Preliminar de El Tatio: *“Se han suspendido las perforaciones a los 150 metros de profundidad, en vez de los 100 previstos. Para proseguir, hace falta invertir seiscientos cuarenta mil pesos más.”* Lo que equivalía a dieciséis mil libras esterlinas de ese año. Juan Floreal Recabarren, citando a un cronista de la época, escribe: *“Los empresarios sacaron sus cuentas y, como el crupier de la mesa de juego, exclamaron: ¡no va más!”*

La crisis de 1929 terminará de enterrar las esperanzas de desarrollar la geotermia en Chile y de que la geotermia contribuya a su vez al desarrollo del país, tal como veía con meridiana claridad Ettore Tocchi.

Habrá que esperar la década de 1960 para que la promesa del vapor vuelva a tener cabida en los proyectos energéticos nacionales. Y habrá que esperar los años 2000 para que esa “potente central eléctrica geotérmica” se haga realidad.

Hoy Cerro Pabellón inyecta 81 mw al Sistema Eléctrico Nacional.

Si Ettore Tocchi estuviera entre nosotros, merecería que le dedicáramos un brindis. Pero como no está, le dedicamos por lo menos las páginas que siguen.

# MAPA GLOBAL DE PLACAS TECTÓNICAS



*Antiguos baños romanos de Aquis  
Querquennis en la localidad de Bande  
(Galicia, España). Sus aguas termales  
poseen un origen natural geotérmico.  
© Jure Gasparic*





**CALOR, AGUA Y VAPOR**

**V**olvamos atrás. Mucho más atrás. E imaginemos el temor reverencial que las erupciones volcánicas, los terremotos y otras violentas y colosales manifestaciones de fenómenos geotérmicos o asociados a la geotermia deben haber provocado en las primeras poblaciones humanas. Se trata de un temor y un respeto que, incorporados y elaborados mucho después en complejas cosmogonías y cultos religiosos, no han abandonado a la humanidad a lo largo de toda su historia.

## Infiernos sagrados

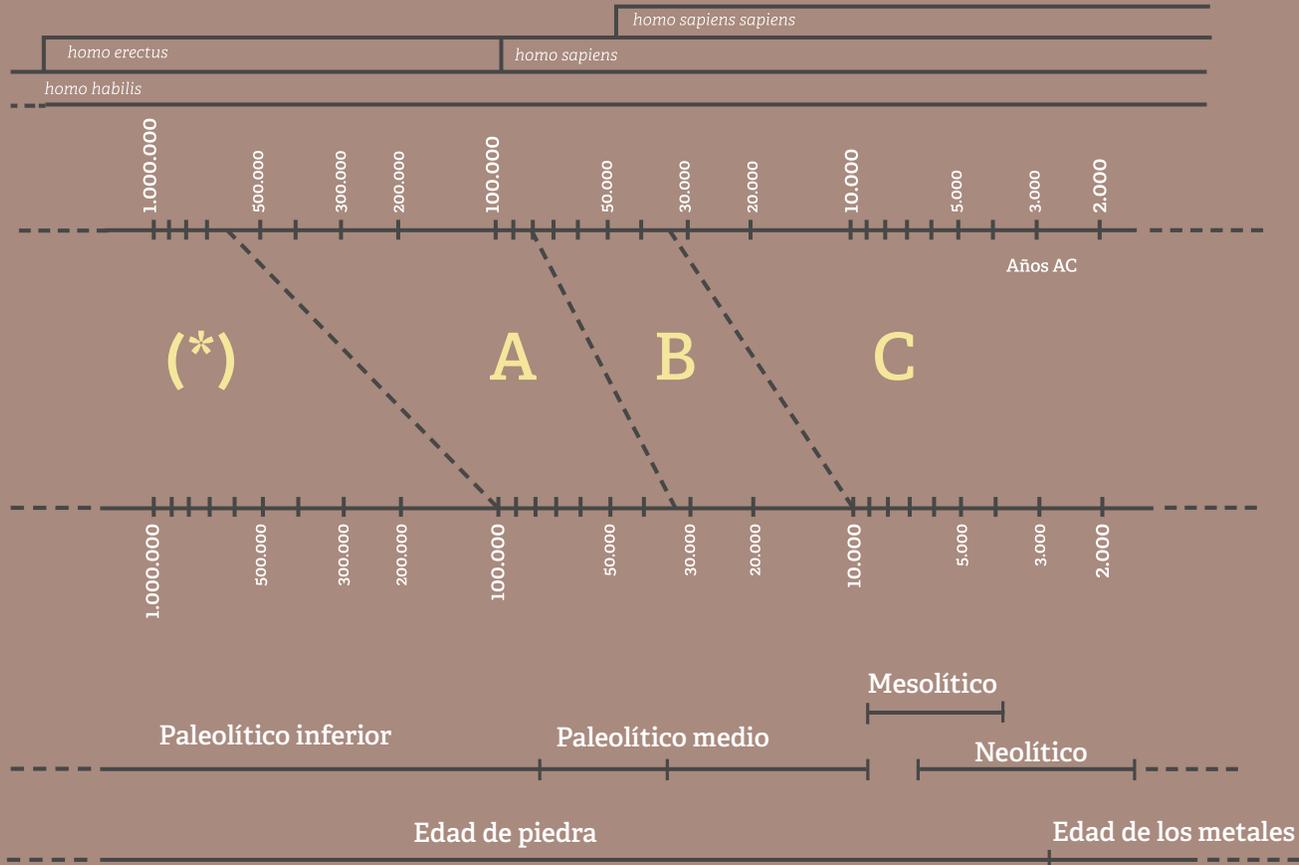
Sí, el mundo bajo la superficie albergaba infiernos habitados por entidades poderosas, veleidosas e irascibles. Pero al mismo tiempo, y a medida que las sociedades humanas desarrollaban sus capacidades y expandían su presencia en varios continentes, el misterioso y sagrado calor de la tierra comenzó también a proveer generosamente las fuentes termales, la cocción de alimentos en aguas hirvientes o en contacto con piedras incandescentes y, algunos miles de años antes de finalizar la prehistoria, los primeros usos higiénicos y terapéuticos (fangoterapia, desinfección y curación de heridas y tonificación de la piel) atestiguados por antiguos relatos orales y leyendas. De este modo, la geotermia se convirtió en una de las primeras fuentes de energía utilizadas por la humanidad.

*Las poblaciones prehistóricas probablemente desarrollaron vínculos religiosos respecto de las manifestaciones naturales asociadas al "calor de la tierra". En la imagen, volcán Parínacota (Putre, Chile). Serneagomin.*

La aparición de usos sistemáticos del calor natural proveniente de las profundidades de la tierra coincide con el surgimiento de los primeros asentamientos humanos estables, muchos de los cuales practican una



# PREHISTORIA: UN LARGO CAMINO



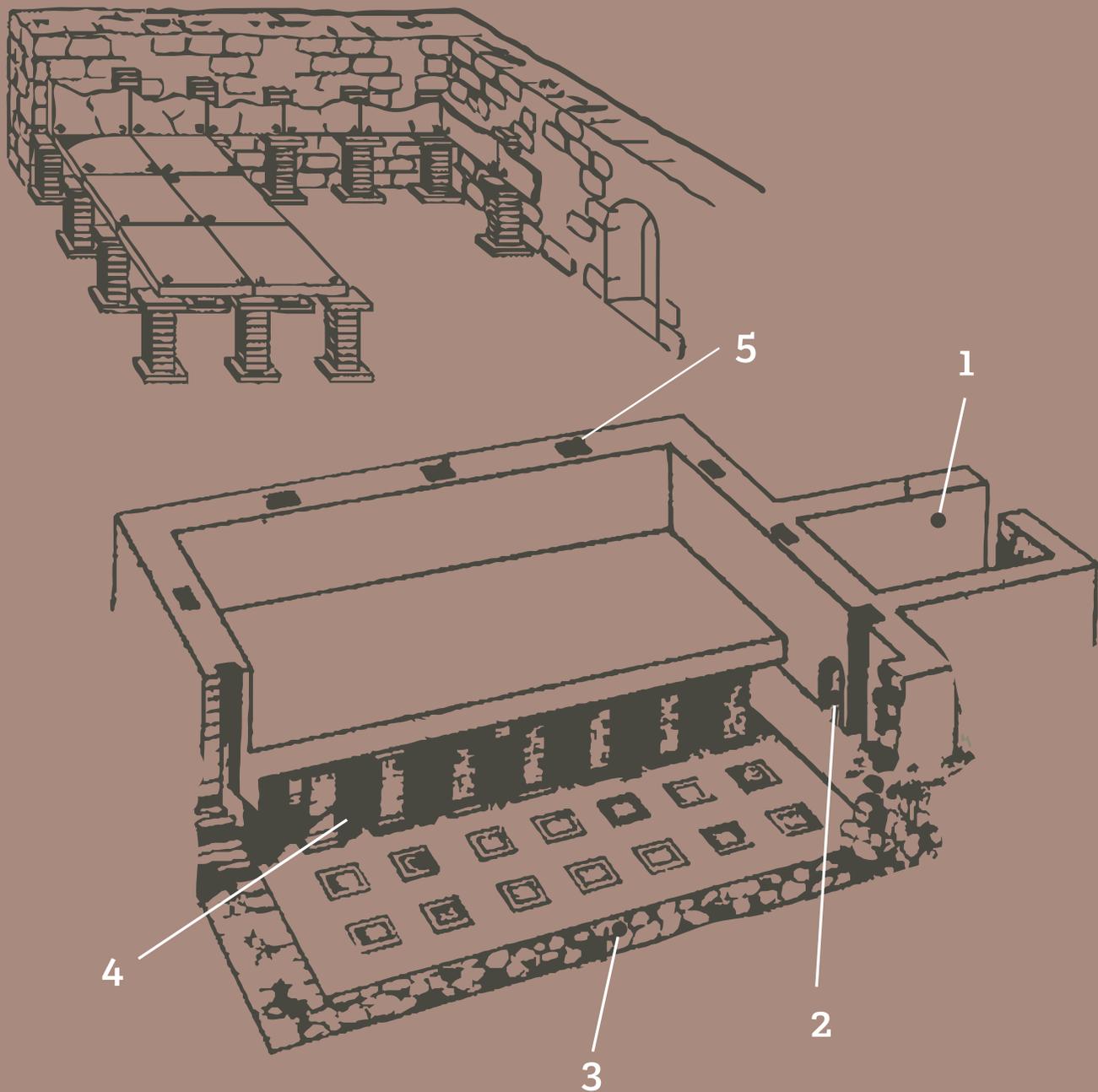
(\*): Primeros contactos con fenómenos geotérmicos

A: Baños en aguas termales naturales y uso temprano de rocas volcánicas

B: Preparación de alimentos en aguas muy calientes

C: Primeras aplicaciones terapéuticas (fangoterapia, secado de heridas, cura y tonificación de la piel) y uso desarrollado de piedras de origen volcánico (obsidiana y otras rocas ígneas)

# HIPOCAUSTO ROMANO



El sistema de calefacción del suelo por hipocaustos fue inventado en Grecia y perfeccionado en el siglo I a.C. por el arquitecto romano Caius Sergius Orata. Fue utilizado sobre todo en los baños termales.

- 1- Sala de calefacción (alimentada por una fuente geotérmica natural o por calderas)
- 2- Abertura en la pared para permitir el paso del vapor desde la sala de calefacción a los baños
- 3- Subsuelo
- 4- Hipocaustos
- 5- Canales alveolados que permiten que el aire caliente calefacte paredes y salas adyacentes

agricultura que se beneficia de los ricos suelos próximos a áreas volcánicas. Poco a poco se establece una relación convivial, aunque siempre investida por la sacralidad, entre las comunidades y un entorno en el que prevalecen los fenómenos superficiales de la actividad geotérmica, tales como volcanes, fuentes termales, fumarolas y diversos depósitos hidrotermales de caolinita, azufre, óxido de hierro, bórax, etcétera.

En la que se considera la primera “ciudad” del Neolítico, Çatal Hüyük, que en su apogeo llegó a cubrir 13 hectáreas y estaba localizada al sur de la península de Anatolia (Turquía), se ha descubierto una gran pintura mural que muestra la erupción del volcán Hasan Dag, acaecida hace unos 8.200 años. Hay que imaginar la gran conmoción que este violento evento geotérmico, que tuvo lugar a unos 140 kilómetros de la urbe prehistórica, produjo en la población de toda la región, al punto de generar una acabada representación artística que lo hiciera perdurar en el tiempo y la memoria.

## Baños termales

Al iniciarse la Antigüedad, la cocción de alimentos con calor geotérmico, los baños termales y la cura de afecciones cutáneas con barros termominerales eran prácticas extendidas en toda la región mediterránea. Y por supuesto, entre los etruscos. Arribados, durante el siglo XII a.C., a lo que hoy es la región de Toscana en Italia, los etruscos -grandes navegantes y comerciantes- desarrollaron la primera industria conocida de productos basados en recursos geotérmicos, y desarrollaron una intensa vida social y una cultura de ejercicio físico en torno a los baños termales naturales. Dada la magnitud de los fenómenos geotérmicos en la región, en la que se asienta el célebre Valle del Diablo, no es una simple casualidad que haya sido la misma Toscana la que presenció, tres mil años más tarde, el nacimiento de la tecnología geotérmica moderna.

La cultura etrusca del baño jugó un rol decisivo en el desarrollo romano de la balneoterapia termal y los baños termales recreativos. Aunque ya en el 1.600 a.C. se habían construido baños termales en Lipari (Sicilia), éstos no florecieron en todos los territorios bajo control romano sino desde el siglo I a.C. y hasta el siglo IV d.C., llegando a existir más de 2 mil. De ellos, cerca de mil estaban localizados en la propia ciudad de Roma y eran extremadamente populares en todas las clases sociales.

Los baños públicos romanos cumplían múltiples funciones. En todos había balneoterapia (baños, saunas, fangoterapia); estética corporal (masajes, afeitado, peinado, depilación, cuidados y tonificación de la piel); lucha, culturismo, ejercicios; restaurantes (algunos más formales y otros de comidas rápidas); centros de información; encuentros públicos y privados (políticos, de negocios, culturales, etcétera), eventos sociales y entretenimiento.



*Baños termales romanos en Bath (Somerset, Inglaterra). Diego Delso.*

Además de ofrecer todos estos servicios, los baños termales naturales (con fuentes geotérmicas) eran además centros de culto, sedes de juegos atléticos y otros eventos deportivos, sedes de festividades populares y espacios designados para mercados regionales y locales.

## Más allá de Roma

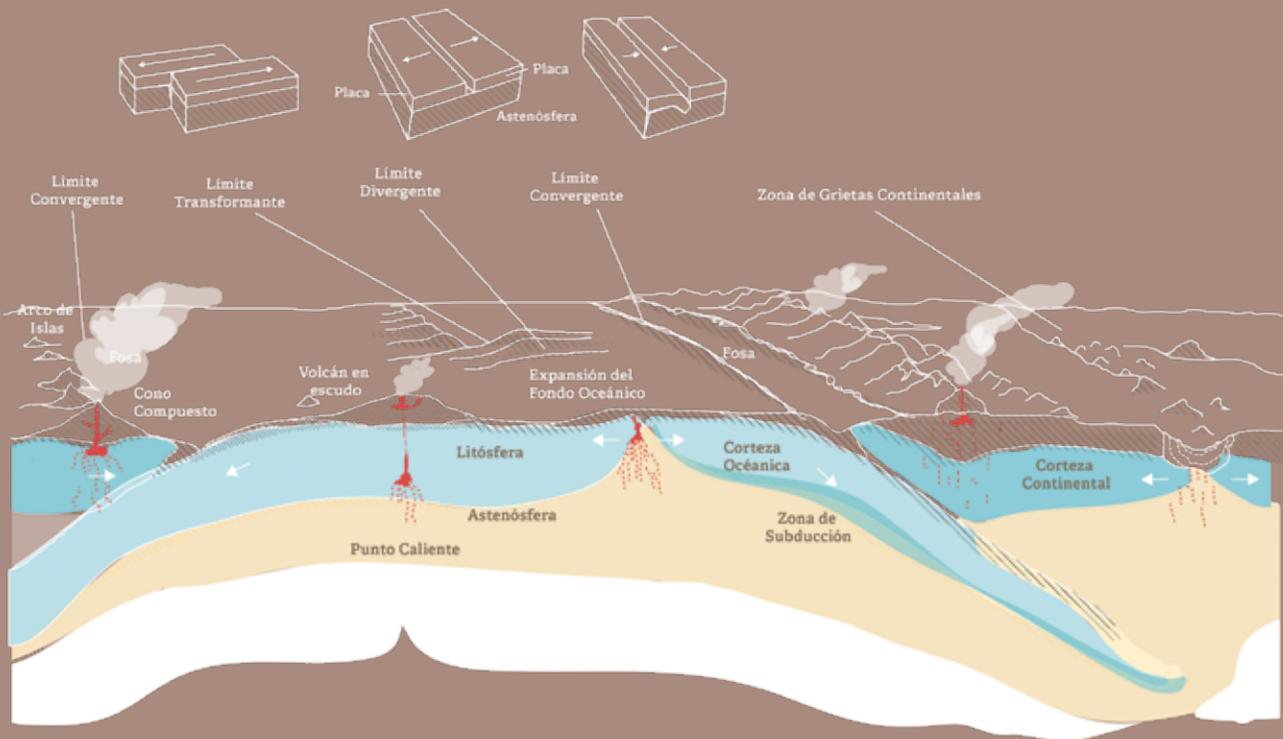
Pero aunque alcanzó una expansión sin precedentes con los romanos, el uso de aguas termales con propósitos terapéuticos en la región mediterránea se remonta, como ya decíamos, al Neolítico. Las propiedades curativas de las aguas termominerales ya eran conocidas en Asia Menor, el sur de Europa y el norte africano por sumerios, babilonios, asirios, fenicios, hititas, cretenses, micénicos, ilirios, macedonios, egipcios, nómadas, sicilianos, etruscos y venéticos.

Durante el apogeo de los baños termales en el Mediterráneo oriental y Anatolia, existieron más de 300. Los más conocidos estaban en Epidaurio, Edipsos y Pérgamo (antigua Eólida, en Asia Menor).

El Talmud -que recoge leyes judías, tradiciones y relatos tanto en el ámbito civil como religioso, y que fue escrito entre los siglos III y V por eruditos de Babilonia y la antigua Israel- recomienda el uso de fuentes termales “para quienes sufren de males de la piel, lepra, dolencias urinarias y del tracto digestivo, reumatismo, artritis y enfermedades nerviosas.”



# ¿QUÉ ES LA TECTÓNICA DE PLACAS?



USGS

La tectónica de placas o tectónica global - del griego *τεκτονικός*, *tektonicós*, "el que construye"- es una teoría unificadora que explica diversos eventos geológicos, basada en un modelo de la Tierra en que la litósfera (porción externa más fría y rígida del planeta) está fragmentada en numerosas piezas en movimiento y desiguales en extensión y grosor, llamadas placas.

La litósfera está asentada sobre la astenósfera, más caliente y probablemente formada por materiales que pueden deformarse. Se estima que algún tipo de transferencia de calor, originado en el núcleo y el manto, pone en movimiento las placas tectónicas.

En los años 20 del siglo pasado, el investigador irlandés John Joly planteó que, debido a la ineficiente conductividad térmica de la corteza, el calor radiactivo generado en la Tierra se acumula bajo la corteza y funde el manto, provocando una convección térmica (la convección es una de las tres formas de

transferencia del calor). A partir de esta proposición se estructuró más tarde la teoría de la convección en el manto, aplicada en los años 30 a la deriva continental. Posteriormente, se propuso que la convección también podía tener lugar en el manto sólido.

Las placas tectónicas se desplazan de modo pasivo obedeciendo a las corrientes de convección. Hay zonas diferenciadas con corrientes ascendentes y otras con corrientes descendentes. Sería el peso de la masa hundida el que arrastraría tras de sí al resto de la placa.

La teoría de la tectónica de placas también explica la formación de las cadenas montañosas (orogénesis). Asimismo, brinda una explicación satisfactoria al hecho que terremotos y volcanes se concentren en determinadas regiones del planeta (tales como el Cinturón de Fuego del Pacífico), o a la localización de las grandes fosas submarinas junto a islas y continentes, y no en el centro del océano.



*Temazcal excavado en las ruinas de la antigua localidad maya Joya de Cerén (El Salvador), enterrada bajo la lava por una erupción volcánica en 600 DC.  
© Mariordo (Mario Roberto Duran Ortiz)*

Tradicionalmente, los turcos han hecho de los baños termales parte integral de su vida comunitaria. Basados parcialmente en la tradición romana, los baños proveen no sólo espacios de relación social y entretenimiento, sino también soluciones termominerales para curar dolencias reumáticas, ciática, problemas ginecológicos, renales y mentales.

## **América, Asia y Oceanía**

Igualmente importantes en sus respectivas culturas, los saunas finlandeses y los baños japoneses y árabes poseen orígenes diferentes a los del área mediterránea. En Japón, la existencia de baños termales ha sido rastreada hasta 11 mil años a.C., aunque su uso terapéutico para enfermedades crónicas sólo es atestiguado desde 1734.

En América precolombina, diversas localidades mesoamericanas y norteamericanas practicaban el llamado Temazcal (del náhuatl *temazcalli*, “casa donde se suda”), un baño de vapor ritual y terapéutico (desintoxicación por sudoración) que se obtenía rociando con agua fría piedras volcánicas incandescentes. En lengua maya se le llamaba *zumpul-ché* y en mixteco, *ñihi*.

El uso de agua termales entre los chinos data de hace unos 3 mil años. Usos como la cocción de alimentos, el lavado de ropas, el tratamiento de enfermedades de la piel y actividades recreacionales en las que no escaseaba el té, los vinos de arroz y licores, eran comunes sobre todo en lo que hoy es Taiwán y Tíbet.

En Nueva Zelanda, los maoríes usaron la energía geotérmica en ámbitos tan diversos como la agricultura, cocina, baños, calefacción y terapias. Tradicionalmente han venerado el calor de la tierra, el que piensan que es resguardado por guardianes divinos.

## Calefacción distrital geotérmica hace 2 mil años

No podemos cerrar el tema de la vida social y los desarrollos tecnológicos asociados a la energía geotérmica en tiempos premodernos sin mencionar brevemente algunos hechos notables en relación a la canalización de flujos.

En Éfeso, localizada en la actual Turquía occidental y gran centro comercial del Mediterráneo en la Antigüedad, se han hallado tuberías que permitían hace más de 2 mil años la calefacción geotérmica de gran número de construcciones en barrios de la ciudad. Una tecnología semejante fue descubierta en otra cultura que no tuvo contacto con la Grecia clásica: se trata de un sistema de calefacción geotérmica distrital en Paquimé (Casas Grandes), en el norte de México, que estaba en operación durante la primera mitad del siglo XI.

En la localidad meridional francesa de Chaudes-Aigues (Aguas Calientes), ya hacia 1334, funcionaba un complejo sistema urbano de calefacción distrital geotérmica. Un siglo antes, la población vikinga asentada en Islandia había desarrollado tuberías para calefacción mediante el transporte de flujos geotérmicos. También en Islandia, en 1753, se llevó a cabo un exitoso experimento para la producción de sal a partir de la vaporización de agua de mar utilizando calor geotérmico.

*Temazcal azteca representado en el Códice Magliabecchiano (siglo XVI, México). Colección Loubat.*



# EL CÍRCULO DE FUEGO DEL PACÍFICO



USGS

El Círculo, Cinturón o Anillo de Fuego del Pacífico se sitúa en las costas del océano Pacífico y concentra algunas de las zonas de subducción (proceso de hundimiento de una placa tectónica bajo otra) más importantes del mundo, lo que genera una intensa actividad sísmica y volcánica.

Se extiende a lo largo de 40.000 km y tiene forma de herradura. Incorpora 452 volcanes (más del 75 % de los volcanes activos e inactivos del mundo), y la mayoría de los llamados supervolcanes. Cerca del 90 % de los terremotos del mundo tienen lugar en esta zona (y un 80 % de los terremotos de mayor intensidad).

El Círculo de Fuego es generado por la tectónica de placas. La sección oriental del Círculo es el resultado de la subducción de la placa de Nazca y la placa de Cocos bajo la placa Sudamericana, que se des-

plaza hacia el oeste. La placa de Cocos se hunde bajo la placa del Caribe en Centroamérica. Una porción de la placa del Pacífico, junto con la pequeña placa de Juan de Fuca, se hunden bajo la placa Norteamericana. A lo largo de la zona norte del cinturón, la placa del Pacífico, que se desplaza hacia el noroeste, está siendo subducida bajo el arco de las islas Aleutianas. Más hacia el oeste, la placa del Pacífico está subducida a lo largo de los arcos de la península de Kamchatka, en el sur más allá de Japón. La parte sur es más compleja, con una serie de pequeñas placas tectónicas en colisión con la placa del Pacífico, desde las Islas Marianas, Filipinas, Bougainville, Tonga y Nueva Zelanda. Indonesia se encuentra en el Círculo de Fuego a lo largo de las islas adyacentes del noreste, incluyendo Nueva Guinea, y el cinturón Alpino-Himalayo a lo largo del sur y oeste de Sumatra, Java, Bali, Flores y Timor.





*El volcán Licancabur visto desde la planicie de Chajnantor, con formaciones de hielo en primer plano. Volcanes y montañas poseen una entidad espiritual sobresaliente entre los atacameños. B. Tafreshi.*



*Vegetación desértica en el sector de  
Quebrada del Zoquete, Marcela Mella.*

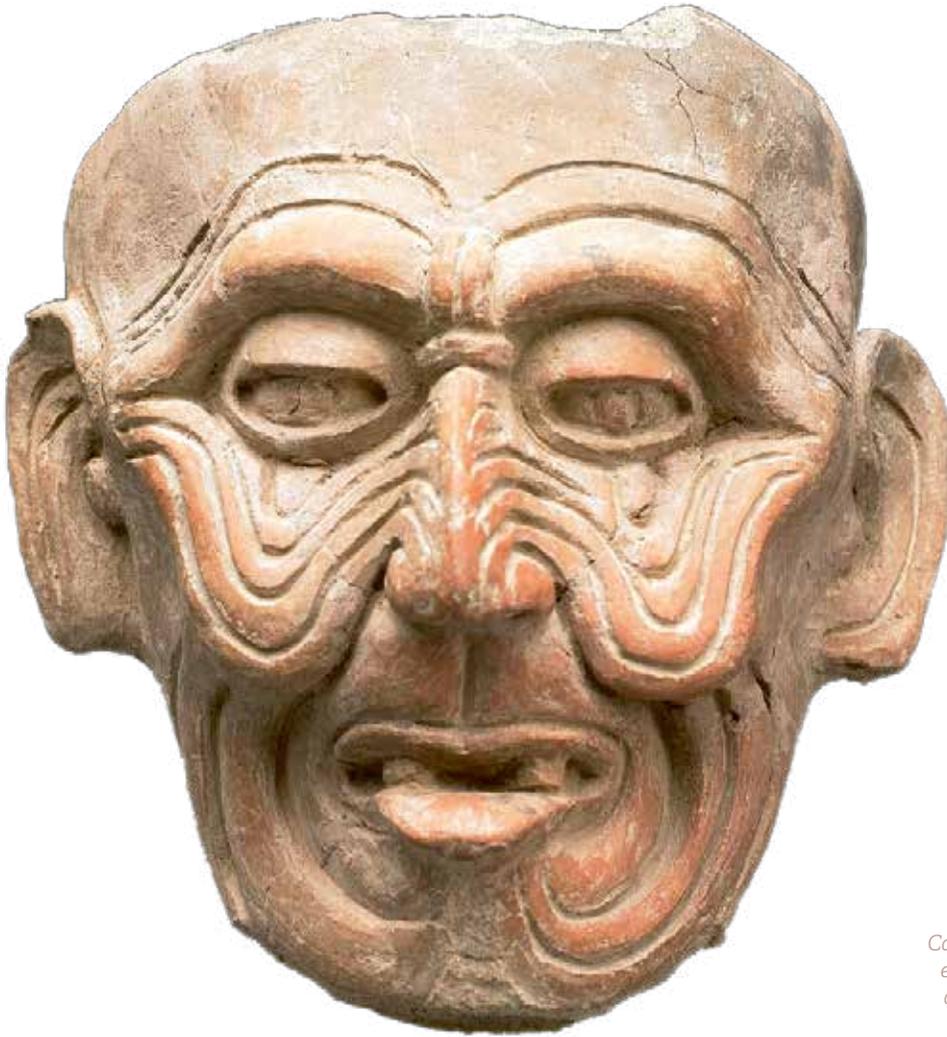
## Geotermia y divinidades

Aún en la actualidad, las comunidades atacameñas o likan-antai (norte de Chile, noroeste de Argentina y suroeste de Bolivia) reverencian y mantienen una relación profunda y cotidiana con la *pachamama*, el espíritu de la tierra. Y no es casualidad que, al menos en Chile, todos los ritos y ofrendas al espíritu de la tierra se hagan orientados hacia el este y las alturas andinas, al lugar en que nace el sol y se eleva una constelación de montañas y volcanes andinos que poseen vida propia. La vida -en la más amplia acepción de la palabra- proviene de aquellas alturas sagradas, en muchas de las cuales existen altares que han estado allí desde la época precolombina. Volcanes (*apu*) y montañas (*mallku*) poseen una entidad divina sobresaliente en la cosmovisión atacameña. Algunas tienen más importancia para el conjunto de comunidades (es el caso, por ejemplo, del volcán Licancabur, “montaña del pueblo” o “del país”, situado en la frontera chileno-boliviana) y otras son relevantes sobre todo para localidades específicas. Tareas estacionales claves como la “limpia de canales” de riego están investidas por la sacralidad y no se llevan a cabo sin el *huaqui*, “pago” o “permiso” a la tierra, mediante el cual se restablece cíclicamente un equilibrio al devolver a la *pachamama* lo que los hombres han tomado de ella.

La relación de los atacameños -comunidades que aún mantienen sus tradiciones en el Altiplano andino- con los fenómenos geotérmicos es reverencial, pero distante, a diferencia de la relación convivial establecida con el calor de la tierra en otras latitudes. De hecho, los centros de culto atacameños se encuentran en las cumbres desde tiempos remotos, distantes de los centros de población.

En otros lugares del mundo se observa una semejante sacralidad en las relaciones entre comunidades humanas y fenómenos geotérmicos. Para los maoríes, volcanes, fuentes termales y fumarolas son *Wahi Tapu*, término con el que describen lo sagrado. Una percepción de los fenómenos geotérmicos muy similar a la de los Sioux, que los llamaban *Wakan Tanka* (Gran Misterio).

El calor o fuego de la tierra era -y aún es- un regalo de los dioses para el provecho de los humanos en múltiples culturas a lo largo y ancho del mundo. Al mismo tiempo, los seres o entidades que habitan los mundos subterráneos son tan inmensamente poderosos e impredecibles que no cabe sino una actitud reverente hacia ellos. Como señala el investigador mexicano M. C. Suárez, “en muchos lugares y en diferentes épocas, la energía geotérmica tuvo una interpretación preponderantemente religiosa y una relación ética dual: constructiva / destructiva, beneficiosa / dañina, buena / mala, provechosa / malévolas”.



*Cabeza de terracota de Huehuetotl, el "dios viejo", como solía conocerse a la antigua divinidad del fuego en Mesoamérica. Sean Pathasema.*

## **Cultos inmemoriales**

En la Italia neolítica, ya existían prácticas religiosas y ritos funerarios vinculados a manifestaciones geotérmicas, muchos de los cuales tenían lugar en cavernas con aguas subterráneas. Se han hallado grandes vasijas en entierros en Sicilia, situados en túneles naturales con vapores sulfurosos a unos 39°C.

En la Grecia antigua, se agradecían las propiedades curativas de las aguas termales erigiendo en su proximidad templos dedicados a Asclepio, divinidad de la medicina e hijo de Apolo y la mortal Coronis. Las aguas termales eran sagradas, un generoso regalo de los dioses olímpicos.

Los romanos erigían altares a sus dioses y diosas en las fuentes termales. En el altar a la diosa Minerva en las fuentes termales de Bath (actual suroeste de Inglaterra), los arqueólogos hallaron cerca de 130 tabletas de plomo en las que la gente había escrito diversos ruegos a la diosa.

Huehuetéotl, dios del fuego y la divinidad más antigua de Mesoamérica, estaba directamente relacionado con los volcanes y la tierra. Su representación como un hombre viejo se asocia a la antigüedad de los fenómenos geotérmicos. Un “punto de vista” radicalmente distinto del de las antiguas poblaciones japonesas, para las que el dios del fuego Kagutsuchi era un joven dios -hijo de las divinidades centrales Izanami e Izanagi- que habitaba los volcanes y cuya furia se expresaba en sus erupciones.

En la isla de Bali (Indonesia), inmemoriales creencias originadas en el Neolítico se fundieron con posteriores influencias hinduístas y budistas en torno al concepto de montaña sagrada. En un universo ordenado desde las alturas del cielo y las cimas volcánicas, donde habitan divinidades que pueden o no favorecer a los hombres, hasta las profundidades del océano, en las que viven peligrosas entidades, todo lo que es sagrado se sitúa en lo alto. En este sentido, no es casual que uno de los lugares más sagrados en un templo budista de Bali sea el altar con ofrendas dedicadas al espíritu y la vida manifiesta del volcán Gunung Agung.

*Volcán Gunung Agung en Bali.  
David Leiter.*



*En primer plano, incrustaciones de  
azufre y ácido bórico.  
Campo geotérmico de Larderello.  
Colección Fabio Sartori (Italia)*



A dramatic landscape of a volcanic field. In the foreground, a path of dark, jagged rocks is covered with vibrant green and yellow moss. The path leads towards a dark, rocky mountain peak in the distance. The sky is filled with dark, heavy clouds, with a hint of light breaking through on the left side. The overall atmosphere is mysterious and somber.

**EL LUGAR DONDE  
ESTUVO EL INFIERNO**

*Fluyen por el lecho las humeantes aguas  
por el vapor que la tierra cobija en su vientre  
que desde el abismo las arroja hacia lo más alto*

*Versan le vene le fummifere acque  
per li vapor che la terra ha nel ventre  
che d'abisso li tira suso in alto*

El paisaje que describe el gran poeta florentino Dante Alighieri en el Libro VI de las Rimas existe en la realidad. Y quizá el autor de la Divina Comedia lo visitó alguna vez. O muy probablemente escuchó hablar de él. No está tan lejos de Florencia, algo más de 60 kilómetros en línea recta hacia el suroeste de Toscana. Es el llamado Valle del Diablo, permanentemente envuelto en una niebla espectral proveniente de una multitud de fumarolas, columnas de vapor y pozas en ebullición con pestilentes emanaciones de ácido bórico, amoníaco y dióxido de carbono.

Aún intocado durante gran parte de la Edad Media, este umbral de los mundos subterráneos debió parecer a los contemporáneos del Dante una imagen viva del flamígero y tan temido infierno, al que las almas pecadoras eran llevadas para sufrir castigo eterno. Aún debían transcurrir siglos para que el valle presenciara nada menos que el surgimiento de la tecnología geotérmica moderna en el mundo, la que por supuesto todavía resultaría algo diabólica para más de algún observador en los inicios del siglo XX. Pero no nos adelantemos.

## **Decadencia, eclipse y renacimiento**

Tras la caída del Imperio de Occidente en el siglo V, la industria etrusca y romana de productos derivados de la geotermia y los tratamientos terapéuticos -además de la política, los negocios y la diversión- basados en los baños termales habían declinado hasta desaparecer. La balneoterapia y el uso de ciertos minerales hidrotermales sólo se reactivó de modo gradual y disperso a partir de la Baja Edad Media, en Toscana y otras zonas geotérmicas de la península itálica. No obstante, estas prácticas no alcanzaron la escala y el impacto socioeconómico que tuvieron en la antigua Roma, limitándose al ámbito local.

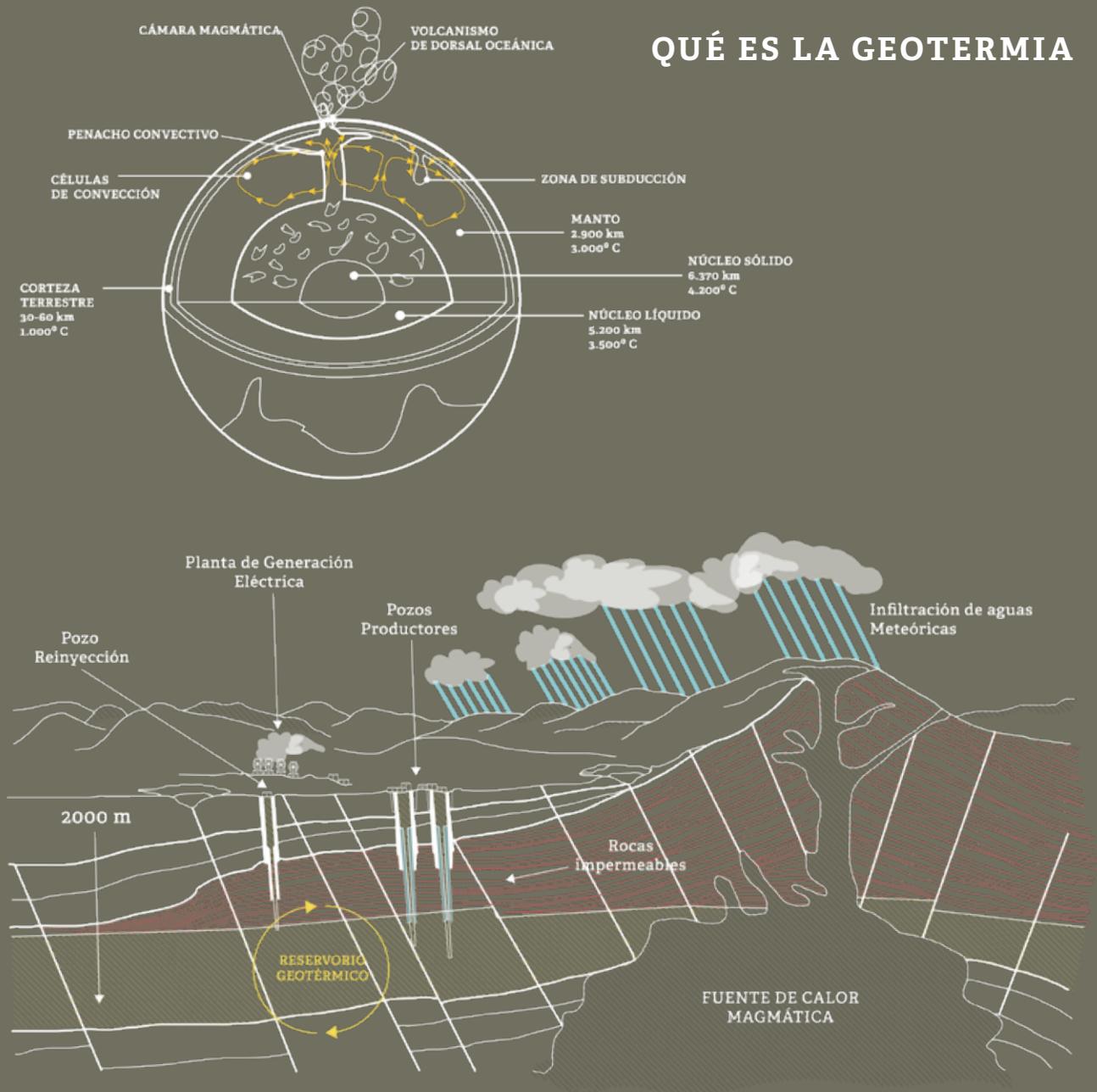
Salvo en el caso de Toscana, a partir de fines del siglo XV. La guerra por el control del área geotérmica del Valle del Diablo entre las municipalidades de Volterra y Florencia -conflicto conocido como la *Guerra delle Allumiere*- se saldó con la victoria en 1472 de esta última, lo que entregó el dominio de la zona a la familia Médici.

La explotación de minerales hidrotermales en el área se convirtió así en un monopolio de la República de Florencia, el cual fue asignado a la Corporación de la Lana florentina. La industria textil de la ciudad se vio enormemente favorecida por el acceso a compuestos bóricos y otros minerales que previamente debía importar, convirtiéndose en

# MAPA DE LA LOCALIDAD DE LARDERELLO COMUNA DE POMARANACE, REGIÓN DE TOSCANA



# QUÉ ES LA GEOTERMIA



La palabra geotermia viene del griego *geo* ("tierra") y *thermos* ("calor"). Dicho en términos sencillos, es el calor de la tierra. Este calor interno del planeta proviene tanto del núcleo como de la desintegración de isótopos radiactivos (U235, U238, Th232 y K40), y es el resultado de la formación de la Tierra hace algo más de 4.500 millones de años.

En términos económicos o industriales, la energía geotérmica es el calor acumulado en las rocas del subsuelo (sistema geotérmico) a profundidades que resultan industrialmente rentables, y que puede transformarse en energía eléctrica mediante una planta geotérmica. Para considerarla un recurso, se

requiere que una gran cantidad de energía térmica con temperaturas entre 150°C y 300°C esté almacenada en roca permeable y relativamente cercana a la superficie (entre 1 y 3 kilómetros de profundidad). Los recursos geotérmicos son renovables y se encuentran disponibles sólo en determinados lugares del planeta, bajo forma de sistemas geotérmicos. Son cuatro los elementos principales de que consta un sistema geotérmico: fuente de calor, reservorio, fluido geotérmico y capa sello. El fluido geotérmico es clave, ya que permite el desarrollo de este proceso de transformación de energía, extrayéndose mediante pozos productores y devolviéndose al reservorio con ayuda de pozos reinyectores.

una de las más importantes de Europa. Sin embargo, su extracción intensiva durante más de dos siglos terminó por agotar las reservas minerales superficiales en la zona. A partir de la segunda mitad del siglo XVIII, la actividad decae ostensiblemente.

No será hasta la segunda década del siglo XIX que la llamada “región boracífera” de Toscana recobrará vitalidad productiva, debido a una nueva y floreciente industria boratera, desarrollada por el ingeniero y empresario francés François Jacques Larderel.

## Una nueva industria química

El desarrollo de la nueva industria boratera en Toscana fue precedido por el descubrimiento en 1777 de ácido bórico en las manifestaciones de actividad geotérmica en Monterotondo Marittimo (al sur de Volterra) por parte del químico alemán Hubert Franz Hoefer. Dos años más tarde, el científico italiano Paolo Mascagni confirmó el hallazgo en Castelnuovo Val di Cecina (al norte de la primera localidad y muy próxima a la actual Larderello), utilizando una técnica diferente.



Francesco de Larderel.  
Archivo Histórico Enel (Italia)

El hallazgo fue clave, ya que el ácido bórico -también conocido como sal sedativa de Homberg- era muy utilizado por los farmacéuticos en la época, sobre todo para tratar afecciones oculares. Su inesperada disponibilidad en los depósitos hidrotermales toscanos redujo drásticamente los costos del insumo, ya que previamente debía ser importado, desde Persia, India e incluso China, un borato (compuesto) conocido como tincal, del cual se extraía el ácido bórico.

La oportunidad de negocios era evidente, y ya en 1812 se estableció la primera empresa que extraía ácido bórico de los *lagoni* (pozas de agua fangosa bullente y rica en minerales hidrotermales) en lo que hoy es Larderello. Una segunda empresa abrió sus puertas entre 1815 y 1816. Las altas temperaturas requeridas para procesar las salmueras eran obtenidas mediante la quema de leña de los bosques cercanos. En apenas 10 meses, 36 toneladas de ácido bórico fueron despachadas a precios muy atractivos al mercado francés, ávido por el nuevo producto toscano.

## El vértigo de la innovación

Recién en 1818 se estableció en la zona una tercera empresa productora de ácido bórico, la cual terminaría por hacer historia. Chemin, Prat, La Motte & Larderel estaba constituida por cuatro socios franceses exiliados en Livorno. François Larderel fue designado director técnico del emprendimiento. Y muy pronto introdujo un primer avance tecnológico: la creación de *lagoni* artificiales en áreas ricas en incrustaciones hidrotermales desecadas.

Durante los siguientes 10 años, cerca de 50 toneladas anuales de ácido bórico fueron vendidas en los mercados europeos. Pero en 1827 sobrevino una crisis anunciada: la zona había sido deforestada por el uso intensivo de la leña, quemada para generar el calor requerido por el



*Primera Central Geotérmica  
en la ciudad de Larderello, Italia.  
Archivo Histórico Enel (Italia)*

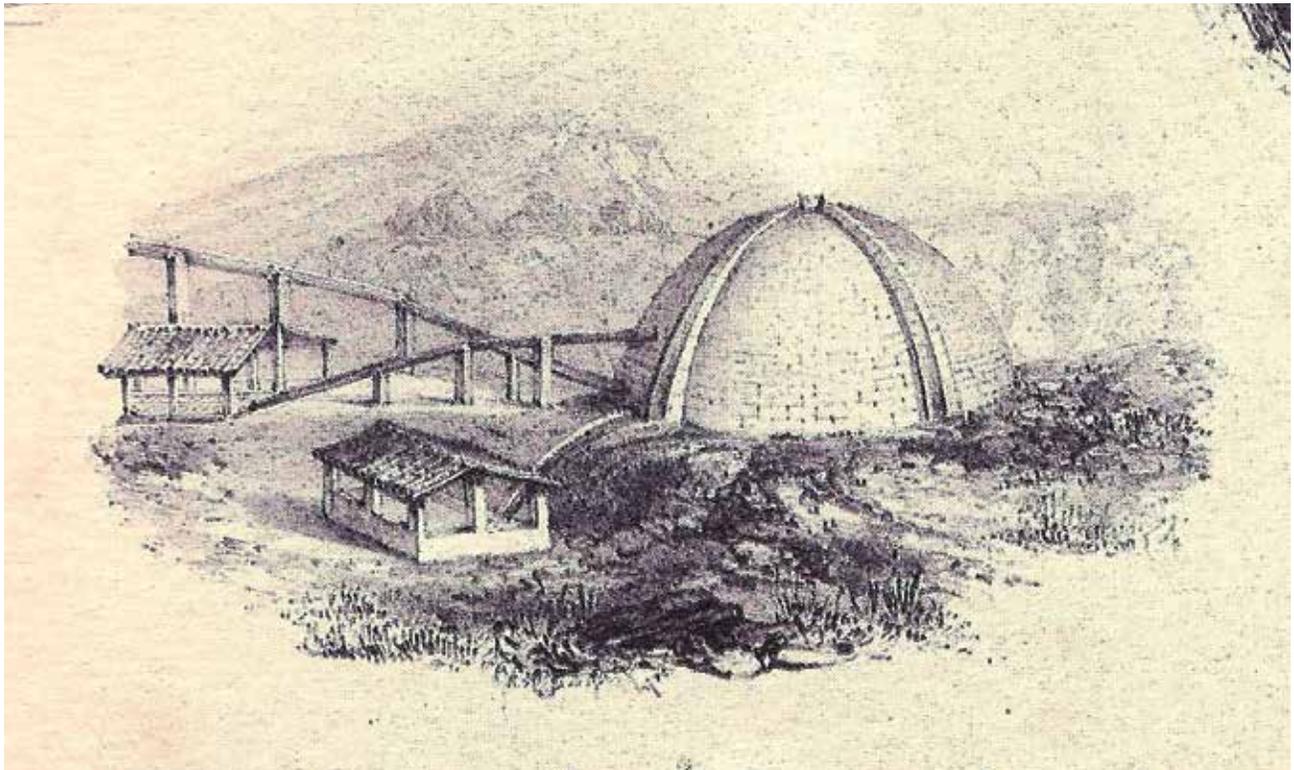
proceso productivo. Parecía un callejón sin salida. La sociedad fue finiquitada mediante la compra de todas las restantes participaciones por parte de Larderel, que parecía traerse algo entre manos.

Y así era. Ese mismo año, su segunda innovación tecnológica -de mayor entidad que la primera- fue el *lagone* cubierto. Consistía en una estructura de ladrillos con forma hemisférica que se construía sobre cada *lagone*. La estructura permitía separar el vapor del agua, que sufría un primer proceso de concentración de su contenido salino. El calor del vapor formado en la parte intermedia y superior del domo, a una temperatura de unos 100°C, se utilizaba para evaporar y secar las salmueras, con lo que ya no había necesidad de quemar leña.

Entre 1828 y 1829, Larderel implementó los *lagoni* en cascada. Los *lagoni* situados en una misma línea a lo largo de la pendiente eran conectados por pequeños ductos abiertos en los que fluían las aguas bóricas impulsadas por la gravedad. Las aguas que desbordaban del *lagone* situado a menor altura eran conducidas a tanques de decantación y luego a tanques de secado. Estos últimos eran calentados por el vapor transportado por una tubería desde la parte intermedia y superior del *lagone* cubierto más cercano.

Entre 1832 y 1834, se cavaron pozos de entre 6 y 8 metros en la proximidad inmediata de los *lagoni* naturales, con objeto de incrementar la producción de las aguas boratadas.

*Sistema de "lagone" cubierto para capturar el vapor de manifestaciones superficiales (ilustración de 1850). Arriba a la izquierda se ve la tubería que conduce la salmuera bórica primaria a las partes más bajas del sistema. Al medio, otra tubería extrae el vapor separado en la parte intermedia del dispositivo. Abajo, una tercera tubería conduce la salmuera bórica concentrada a los tanques de vaporización. Archivo Histórico Enel (Italia)*



## La caldera de Adriano

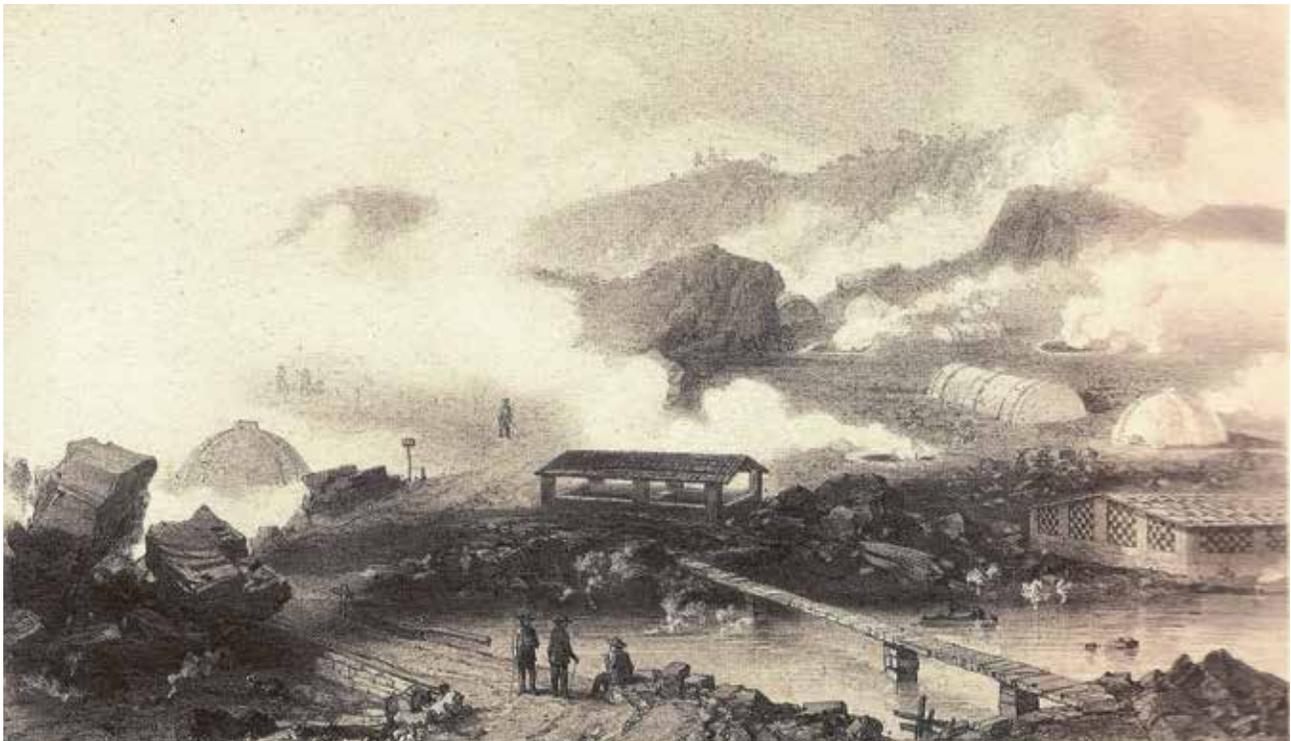
Entre 1840 y 1845 se perfecciona un cuarto adelanto tecnológico, la *caldaia adriana* (caldera de Adriano), llamada así en honor de su inventor, Adriano, uno de los hijos de Larderel. Consistía en una serie de ductos de ladrillo revestidos con láminas de plomo, en los que se hacía circular la salmuera boratada a contracorriente de los flujos de vapor inyectados en el espacio bajo la base de los mencionados ductos de ladrillo.

Debido a estos adelantos tecnológicos, y en sólo 21 años (de 1829 a 1850), la producción de ácido bórico pasó de 125 a 1.000 toneladas anuales. El impacto económico de la actividad de Larderel en la región tuvo tanta relevancia, que el gran duque Leopoldo II de Toscana lo nombró conde de Montecerboli (según el nombre de la localidad en que se asentó originalmente la empresa de Larderel y sus socios en 1818) y rebautizó como Larderello en 1846 la población en la que estaba basada en ese momento la producción de ácido bórico del inmigrante francés y nuevo aristócrata toscano.

Entre 1842 y 1900 se incrementó significativamente la producción de compuestos borácicos obtenidos de nuevos pozos perforados a profundidades cada vez mayores (25 a 30 metros en 1842 hasta entre 250 y 300 metros en 1900).

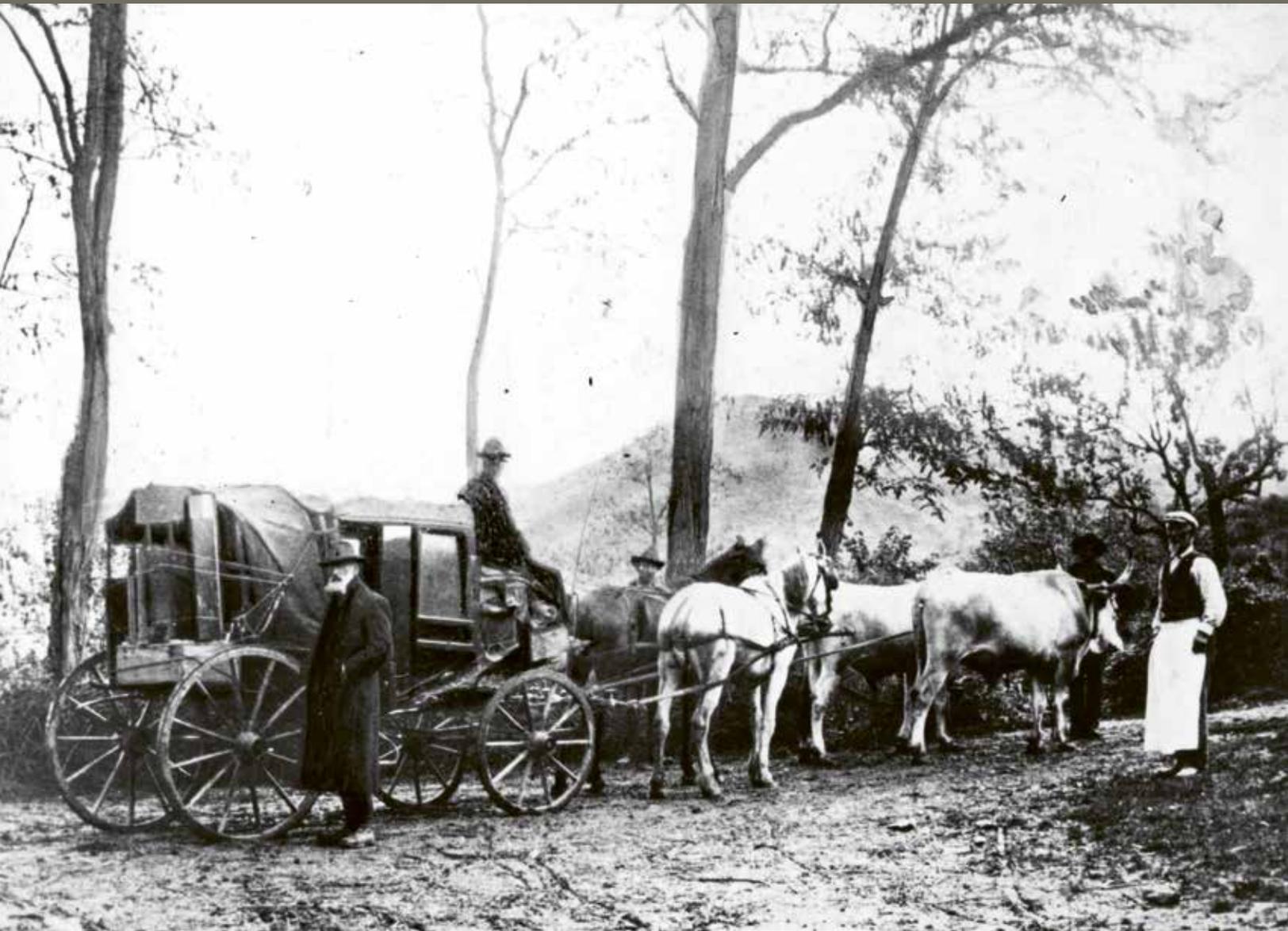
*Ilustración de 1850 sobre la industria del ácido bórico en Larderello. El vapor que fluye de los domos de ladrillos ("lagoni coperti") es recolectado y transportado hacia la llamada "caldera de Adriano" (centro). Archivo Histórico Enel (Italia).*

En la primera mitad del siglo XX se diversifica la producción química. Además del ácido bórico, se produce perborato de sodio, carbonato de amonio y polvo de talco, entre otros insumos altamente demandados por la industria farmacéutica.





*Planta de producción de ácido  
bórico en Larderello, hacia 1915.  
Museo de la Geotermia de Larderello (Italia)*



*Primer laboratorio geoquímico móvil para toma de muestras y análisis de gases y fluidos geotérmicos. El laboratorio estaba montado en una carroza tirada por caballos. Área de Larderello, 1904. Museo de la Geotermia de Larderello (Italia)*

## Nace la industria geotermoeléctrica



*Piero Ginori Conti.  
Museo de la Geotermia  
de Larderello (Italia)*

El príncipe Piero Ginori Conti fue designado director general de la Società Larderello en 1903, algunos años después de casarse con Adriana, hija mayor del conde Florestano de Larderel, nieto a su vez del conde Francesco (como se conoció a François Larderel tras obtener su título nobiliario). El liderazgo del aristócrata florentino -quien había tenido que adquirir sobre la marcha una formación técnica y científica- resultó clave, ya que no sólo modernizó los procesos de producción de la industria química familiar, sino que rápidamente entrevió posibilidades de innovación tecnológica en otros ámbitos de uso de la energía geotérmica.

Apenas asume sus nuevas responsabilidades, Ginori Conti lleva a cabo pruebas de producción de energía mecánica mediante bombas de última generación accionadas por vapor geotérmico, con objeto de estimular pozos y bombear salmuera bórica hacia las instalaciones de procesamiento químico. Ya durante ese mismo año de 1903, se inician los experimentos de laboratorio para determinar la factibilidad de utilizar los fluidos de los pozos para producir ácido bórico y simultáneamente generar electricidad. En los primeros meses de 1904, se implementa el primer laboratorio geoquímico móvil del mundo en una carroza tirada por caballos, para la toma de muestras y un rápido análisis químico de fluidos, gases y sedimentos minerales.

## Un experimento que hace historia

El 4 de julio de 1904, Ginori Conti lleva a cabo un exitoso experimento de producción de energía eléctrica a partir de fluidos geotérmicos. Para ello recurre a un proceso de ciclo indirecto con vapor de agua, obtenido mediante un intercambiador de calor (dispositivo que permite el intercambio de calor entre dos fluidos separados por una pared conductora de altas temperaturas, la cual previene que ambos fluidos entren en contacto). Se logró así que el vapor geotérmico (impuro y que contiene diversas sustancias químicas que podían incrustarse o resultar agresivas para determinados metales en la época) recalentara agua fresca hasta evaporarla.

El vapor depurado -que se obtuvo a partir del fluido original de un pozo cercano a Larderello- activó un motor de pistón conectado a un dínamo de 10 kw. A su vez, el dínamo fue conectado a 5 ampollitas de pocos watts de potencia. Fue en ese momento que se hizo la luz... Por primera vez en la historia, y gracias al genio de Piero Ginori Conti y los adelantos previos de François Larderel, se había generado energía geotermoeléctrica.

En 1905 se instala el primer prototipo de motor alimentado con energía geotérmica, con pistones fabricados por la compañía Cail. El motor es accionado por vapor de agua (obtenido también con un intercambia-

dor de calor) y está conectado a un dínamo de 20 kw de potencia. Como resultado, se iluminará el palacio del príncipe y algunas otras casas con una fuente de energía geotérmica durante los siguientes 10 años.

En 1908 se instala un motor alimentado por energía geotérmica fabricado por Neville Company, en todo semejante al anterior, para la operación de plantas químicas en Larderello y sus inmediaciones.

## La primera planta geotermoeléctrica

Pero sólo es en 1913 cuando entra en operaciones la primera planta geotermoeléctrica del mundo, llamada Larderello 1. Ésta consistía en un generador de turbina de 250 kw fabricado por la Società Franco Tosi, que todavía era alimentado por vapor de agua (ciclo indirecto). Entre paréntesis, es interesante hacer notar que se trata de la misma empresa que envía a Giovanni Severina a Chile y le pide que organice una expedición al Tatio. Franco Tosi Legnano, a través de Severina, está en el origen de la Sociedad Preliminar de El Tatio.

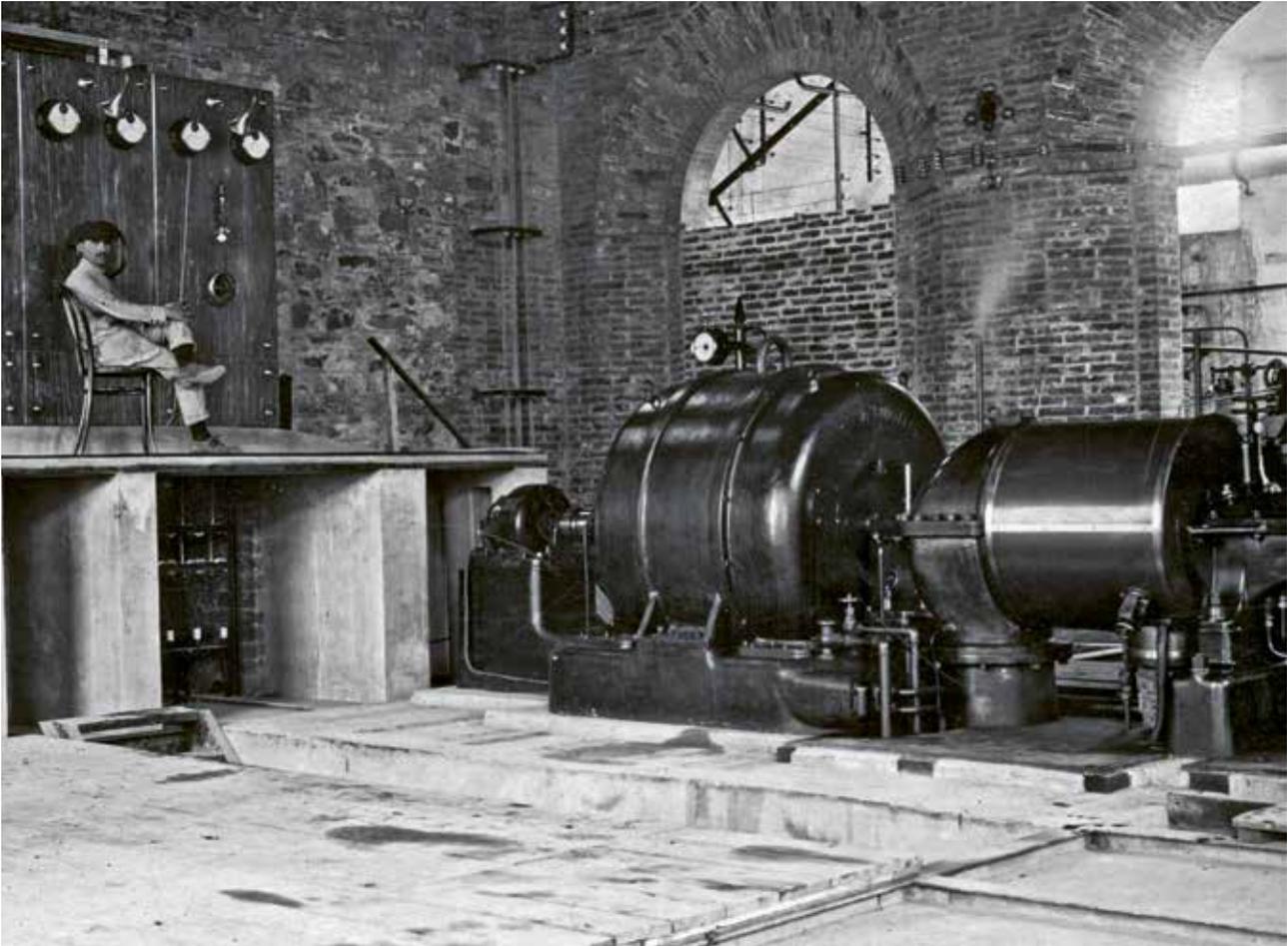
*Salto tecnológico. En 1904, Piero Ginori Conti produce por vez primera electricidad en base a energía geotérmica.  
Archivo Histórico Enel (Italia)*

Pero volvamos a nuestro tema. La planta inaugurada en 1913, generaba energía eléctrica para todas las plantas químicas de la región boracífera y, entre 1914 y 1916, integró las áreas residenciales de Pomarance,



*Primeras perforaciones de pozos  
geotérmicos en Larderello. Pozo Matto (1906).  
Museo de la Geotermia de Larderello (Italia)*



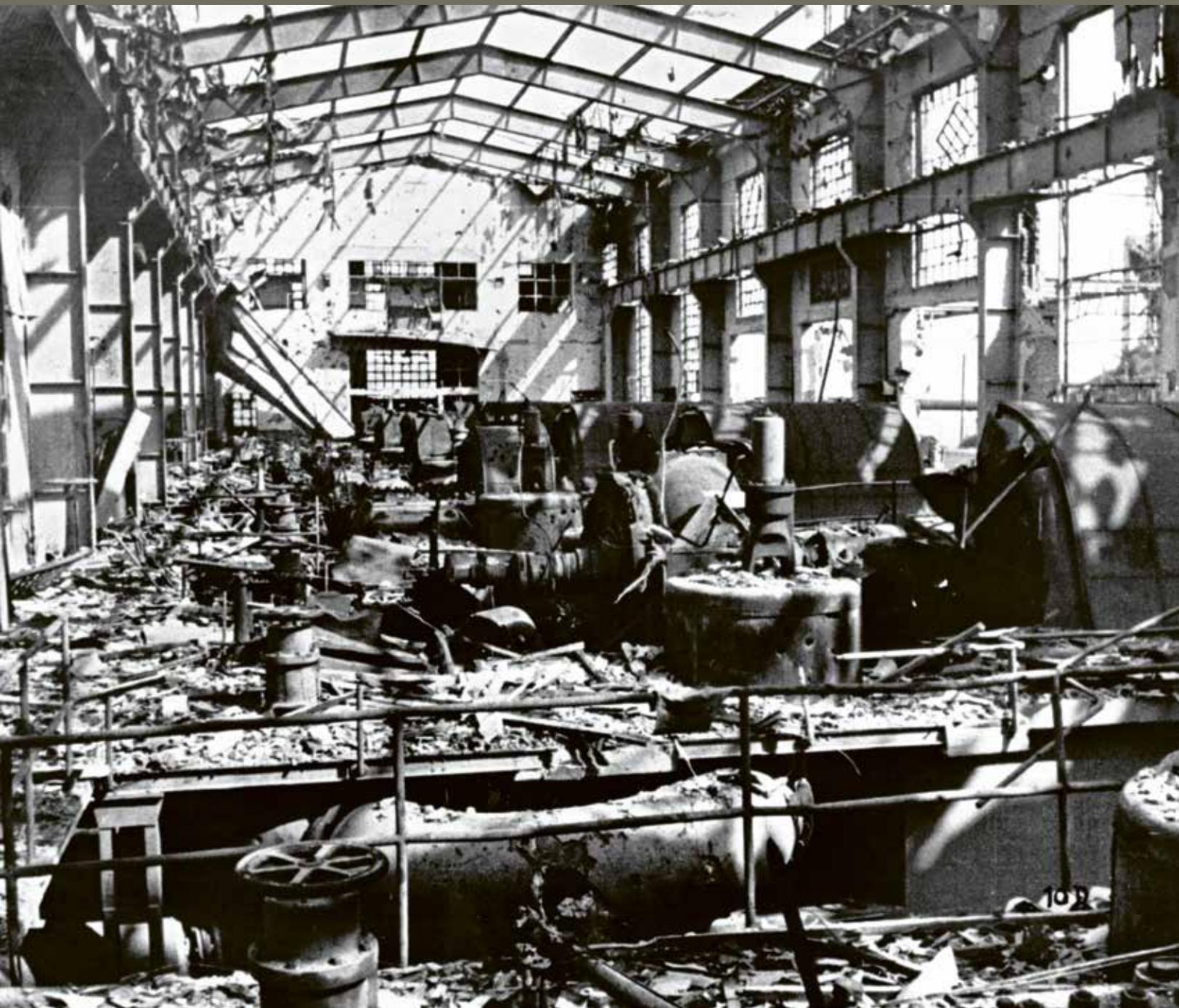


*Primera planta geotermoeléctrica del mundo, inaugurada en Larderello en 1913. Larderello 1 tenía una capacidad instalada de 250 kw. Museo de la Geotermia de Larderello (Italia)*

Saline di Volterra y Volterra utilizando el primer tendido de transmisión del mundo alimentado por energía geotermoeléctrica, que con 25 kilómetros de extensión conectaba a las mencionadas poblaciones con Larderello 1.

En 1916 se desmantela la primera unidad generadora de Larderello 1, siendo reemplazada por dos generadores de turbina fabricados por la Società Franco Tosi, cada uno de ellos (turbina más alternador) de 3,5 MW. Todavía operan con ciclo indirecto. La capacidad de estas unidades era alta, comparable con las mayores unidades térmicas e hidroeléctricas de aquel tiempo.

Con el desarrollo de nuevas tecnologías de materiales, las turbinas de las plantas geotermoeléctricas terminarán siendo activadas directamente por vapor “natural” del fluido geotérmico proveniente de los pozos, obedeciendo al proceso termodinámico denominado “ciclo directo”. Es lo que busca lograr Piero Ginori Conti en 1923, cuando instala en Serrazzano (al suroeste de Larderello) una unidad experimental de generación de ciclo directo de 23 kw. La unidad opera sin problemas durante dos años, tras lo cual es reinstalada en la escuela técnica de Larderello y utilizada para capacitar al personal.



*Planta Larderello 2 destruida por las tropas alemanas durante su retirada de Italia en las postrimerías de la Segunda Guerra Mundial. Junio de 1944. Museo de la Geotermia de Larderello (Italia)*

## Crecimiento imparable

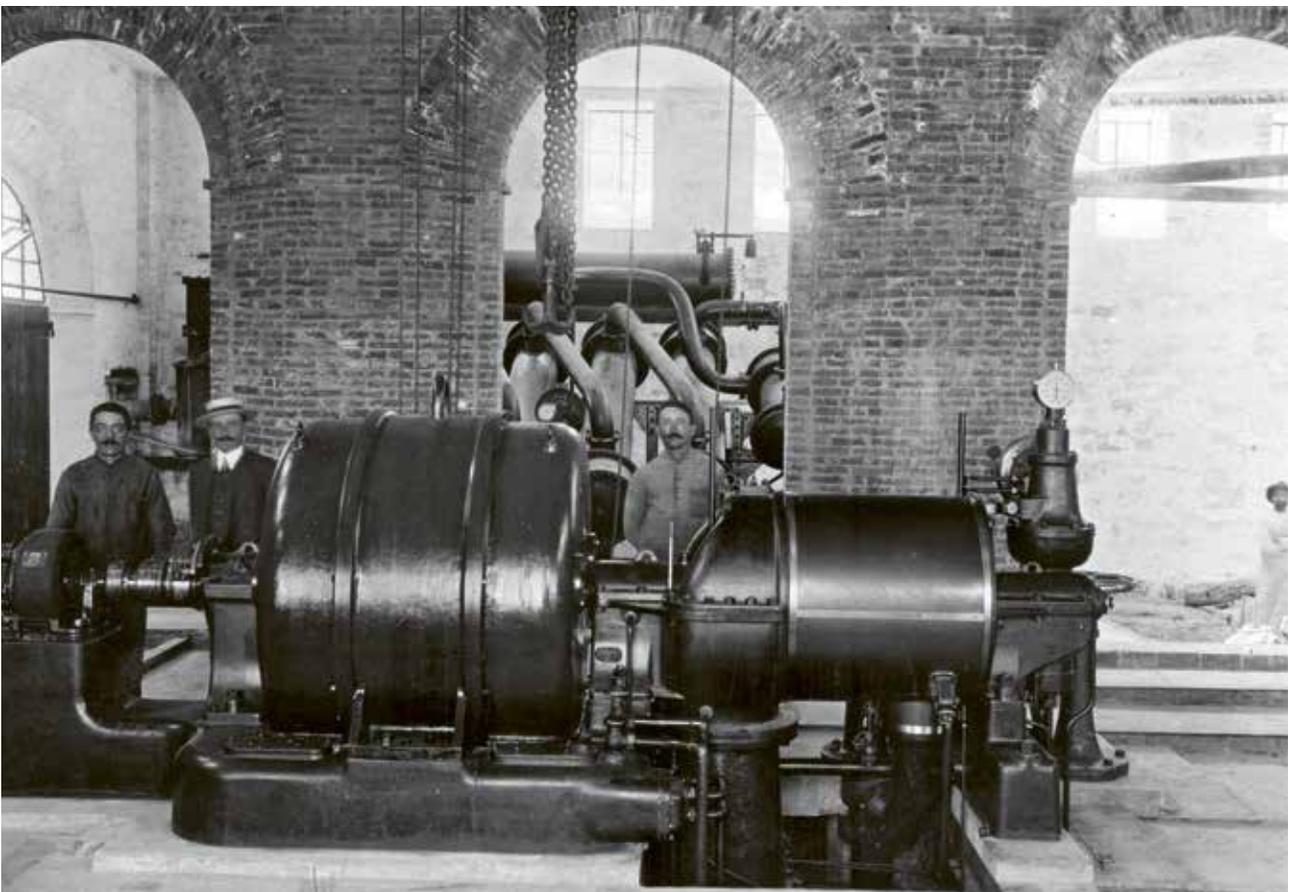
Entre 1926 y 1927 se instalan dos nuevas unidades de ciclo directo en Castelnuovo Val di Cecina, una de 600 kw y la otra de 800 kw. Y en 1930 se instala una unidad de ciclo directo de 3,5 MW en la planta Larderello 1. Ya en diciembre de 1930, la capacidad total de generación geotermoeléctrica en la región boracífera era de 11,9 MW (7 MW de unidades de ciclo indirecto y 4,9 MW de unidades de ciclo directo con escape atmosférico).

La capacidad instalada no dejó de crecer en los años siguientes. Entre 1935 y 1939 entró en operaciones Larderello 2, la primera central geotermoeléctrica de gran escala. Se trataba de seis unidades de ciclo indirecto de 10 MW cada una.

Pese a la merma del ácido bórico contenido en el fluido geotérmico de los pozos, la producción de este y otros componentes químicos todavía resultaba muy rentable.

Ya durante la Segunda Guerra Mundial, entre 1940 y 1943, se instalan en Castelnuovo Val di Cecina cuatro unidades de ciclo indirecto de 10 MW cada una, en todo similares a las de Larderello 2. En Serrazzano, dos unidades de ciclo directo de 3,5 MW y 5 MW. Y en Sasso Pisano, al sur de Larderello, una unidad de ciclo directo de 3,5 MW.

*Turboalternador de la primera planta geotermoeléctrica. Museo de la Geotermia de Larderello (Italia)*





*Frontis del Museo de la  
Geotermia de Larderello.  
Museo de la Geotermia  
de Larderello (Italia)*

## **Destrucción total (o casi)**

A fines de 1943, la capacidad geotermoeléctrica instalada en Larderello totalizaba 129,3 MW (107 MW de unidades de ciclo indirecto y 16,9 MW de unidades de ciclo directo con escape atmosférico).

Entre la primavera y el verano de 1944 sobreviene el desastre. Antes de retirarse ante el avance de los ejércitos aliados, las tropas alemanas destruyen todas las centrales geotermoeléctricas y las plantas químicas de la región boracífera. No queda nada en pie. Salvo un pequeño milagro: bajo los escombros, la unidad generadora piloto de ciclo directo y una capacidad de 23 kw está intacta. Es la unidad que alguna vez operó en Serrazzano y que a partir de 1925 había servido a los estudiantes en práctica de la escuela técnica de la Società Larderello.

Gracias a la electricidad que proveyó esta pequeña unidad y a los grandes sacrificios y esfuerzos de reconstrucción a que se abocaron las comunidades locales, en el otoño de 1944 comenzó una nueva etapa de desarrollo de lo que hoy es uno de los mayores centros de producción de energía geotermoeléctrica del mundo.

## LA GEOTERMIA DE LARDERELLO ATRAVIESA EL CONFLICTO MUNDIAL (1939 – 1951)

Por Giorgio Simone

El año 1939 es crucial para la Società Boracifera Larderello (Sociedad Boracífera de Larderello) y para la geotermia. Además de obtener un formidable éxito con la entrada en funcionamiento de la Central Larderello 2, la primera con una potencia instalada de unos buenos 69 MW, la Sociedad es enlutada por la muerte de su fundador. El 3 de diciembre, en Florencia, fallece el príncipe Piero Ginori Conte a la edad de setenta y cuatro años. Y pocos días después, el 9 de diciembre, aplicando lo dispuesto en el Real Decreto 318, publicado el 20 de febrero de 1939, que legisla en materia de prospección y desarrollo de yacimientos minerales de vapores de gas utilizables para la producción de energía eléctrica, se constituye la “Larderello Società Anonima per lo sfruttamento delle forze endogene” (Sociedad Anónima Larderello para el aprovechamiento de las fuerzas endógenas). El 70% de las acciones están en manos de los Ferrocarriles del Estado, mientras otra parte corresponde al Instituto Inmobiliario Italiano. Los Ginori Conte conservan un pequeño porcentaje minoritario.

La nueva Sociedad Anónima contaba, el 31 de diciembre de 1940, con una fuerza laboral de 1653 empleados, de los cuales 1335 estaban basados en Larderello y 318 en las otras fábricas boracíferas de la zona. La situación de infraestructura del sector geotermoelectrico comprende cinco centrales, con una poten-

cia instalada de 72,5 MW, el alcance medio del fluido a las centrales es de 1000 t/h. Los pozos perforados, en 1904, son 203, de los cuales 100 se encuentran en funcionamiento. El largo de los vaporductos en servicio alcanza los 20 Km. Como se puede constatar, mucho camino se ha recorrido desde los quince operarios que había en 1818.

Mientras Europa está devastada por la guerra, en la zona boracífera, entre 1942 y 1944, entran en funcionamiento las centrales geotérmicas de Castelnuovo, con cuatro turboalternadores de 10.000 Kw cada uno y la de Sasso Pisano, con un grupo de 3350 Kw. La potencia geotermoeléctrica instalada en la Sociedad “Larderello SA” alcanza 126,8 MW, de los cuales 16,8 MW son de descarga libre.

Tras el desembarco en Sicilia de julio de 1943 y el avance hacia el norte a lo largo de la península, el 22 de abril de 1944 los anglo-americanos inician el ametrallamiento y el bombardeo de los establecimientos de Larderello, que continuarán hasta el 26 de junio. El 10 de junio, unos escuadrones de la SS y de nazis-fascistas rastrear la región de Castelnuovo y el 14 de junio llevan a cabo una de las más trágicas represalias a las que dio lugar la liberación de Italia: 77 mineros capturados en la mina de Niccioleta, junto a cuatro partisanos, son masacrados en las cercanías de la Central Geotérmica de Castelnuovo.

Las fábricas son cerradas y las faenas, suspendidas. Larderello SA está de rodillas. Del 27 al 29 de junio los zapadores alemanes, antes de emprender la retirada, destruyen, minándolas, todas las turbinas y los pozos productivos. El 29 de junio, los soldados estadounidenses de la Fifth Army liberan Castelnuovo, Larderello, Pomarance y avanzan hacia Volterra.

Entre las fuerzas de liberación que avanzan por Italia se encuentra también la Segunda División Neozelandesa. Algunos ingenieros que la componen, desde el inicio de la campaña italiana en julio de 1943, tienen como objetivo, ya programado antes de su salida de Wellington, efectuar una inspección en las centrales geotérmicas de Larderello para intentar reunir la mayor información y conocimientos tecnológicos posibles con el fin de construir centrales del mismo tipo en el campo geotérmico de Rotorua, en Nueva Zelanda. En octubre de 1944, cuando las instalaciones geotérmicas están ya en manos de los Aliados, la delegación de ingenieros del Ejército Neozelandés llega a Larderello. Sin embargo, sólo pueden constatar la destrucción total de las centrales a manos de los alemanes y toman una serie de fotografías, presentes aún hoy en los archivos, que demuestran inequívocamente el daño inflingido a cada uno de los cojinetes de los ejes de las turbinas. Daños demasiado precisos para haber sido causados por el bombardeo aéreo.

La posguerra se inicia con cambios también para la geotermia. El 28 de febrero de 1945, la Sociedad Anónima se transforma en Sociedad por Acciones, los Ferrocarriles del Estado adquieren el paquete accionario de la Larderello SA, excluyendo definitivamente a los representantes de las familias Ginori Conti y Larderel.

Entre marzo de 1945 y abril de 1948, se reactivan todos los grupos turboalternadores de las centrales de Castelnuovo y Larderello y se reanuda la provisión de energía eléctrica para la alimentación de los equipos a tracción eléctrica de los Ferrocarriles del Estado. La potencia instalada supera ligeramente a la que existía antes del conflicto bélico, 138.500 kW contra 135.800kW.

Gracias a los extraordinarios progresos en los equipos de perforación, asociados a la utilización del sistema "rotary", en Larderello se construye el pozo nº 82, llamado "la gran fumarola", con un alcance de 300.000 Kg/h de vapor, y el pozo nº 85, en la zona de Valle Secolo, con un alcance algo inferior, de 295.000 Kg/h. Estos dos pozos permiten que Larderello se transforme en la central geotermoelectrica más grande del mundo. El 1 de mayo de 1951, se ultiman los trabajos en la Central Larderello 3, con una potencia instalada de 120.000 kW.

*El vapor escapa de una torre de enfriamiento en una central geotermoelectrica de Larderello. Museo de la Geotermia de Larderello (Italia)*





SEGUNDA PARTE  
**DE LARDERELLO  
AL MUNDO**

## LA POSGUERRA: LETARGO EN CHILE Y EXPANSIÓN MUNDIAL

Mientras Italia abría el camino de la explotación comercial de la energía geotérmica, inaugurando la primera planta geotermoeléctrica en 1913 para llegar apenas 30 años después a 129,3 MW de capacidad instalada, ¿qué había ocurrido en el resto del mundo?

Nada comparable al desarrollo fulminante de Larderello, al menos en un primer momento. En 1918, Nueva Zelanda -futura potencia geotérmica- ya manifiesta interés en replicar en su territorio la experiencia italiana. Japón perfora sus primeros pozos geotérmicos en Beppu en 1919. Y en 1921, Estados Unidos realiza perforaciones en The Geysers, 116 kilómetros al norte de San Francisco, instalando una planta experimental de 20 kWe que operará desde 1925 hasta 1958.

### Top 3

Ese mismo año de 1921 se inician estudios y perforaciones geotérmicas en Chile, a cargo de Ettore Tocchi. “Cuando Tocchi hace el primer pozo para medir temperatura (lo llama “soffione 18 de septiembre”, como atestigua la



*Japón perforó sus primeros pozos geotérmicos en 1919 en Beppu. En la imagen, fuentes termales naturales de Umi-Jigoku, situadas cerca de la misma localidad de la isla meridional de Kyushu. Identificación 71506890 © Molinscat | Dreamstime.com*

prensa local de la época), en ese momento Chile se constituye en el tercer o cuarto país en el mundo en hacer un pozo geotérmico”, dice el geólogo Diego Morata, director del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes y académico de la Universidad de Chile.

“Primero fue Italia, después fue Japón y luego fueron al mismo tiempo Estados Unidos y Chile. Eran pozos de 50 metros, lo que hoy día llamaríamos un pozo de gradiente. Pero eso hizo que Chile entrase al ranking en el top 3 como país que empezó a hacer exploración geotérmica, al mismo tiempo que Estados Unidos. Hay que dimensionarlo así... O sea, si el país hubiese tomado conciencia de lo que tenía, hoy día Chile sería una potencia geotérmica”, concluye algo entristecido Morata.

Pero aunque la aventura de la Sociedad Preliminar de El Tatio termina abruptamente en 1925, aún habrá esfuerzos importantes para promover los estudios y la propuesta de Ettore Tocchi y desarrollar la industria geotérmica en Chile. Uno de ellos tiene lugar en 1948. En su número de septiembre de dicho año, el Boletín Minero de la Sociedad Nacional de Minería publica los informes técnicos de los ingenieros italianos Plinio Bringhenti (sí, el mismo que habían contactado inicialmente los emprendedores antofagastinos en 1917) y Marcello de Leva, referidos a la producción y distribución de energía eléctrica a partir de las “fuerzas endógenas” o “termo-volcánicas” del Tatio. Dicha producción podía convertirse, según Carlos Lanús, el ingeniero civil de la Universidad de Chile que presentaba ambos informes en la publicación, “en el punto de partida de un prodigioso desarrollo industrial del Norte de Chile”.

## Nuevo intento

En su “Informe sobre la zona geotérmica del Tatio”, Bringhenti se basa fundamentalmente en los resultados de las investigaciones geológicas y las perforaciones llevadas a cabo por Ettore Tocchi casi 30 años antes, pero actualiza al momento de la posguerra su propuesta de generación geotermoeléctrica tanto en términos financieros como tecnológicos.

“Entre las diferentes zonas geotérmicas que conozco -escribe-, italianas y extranjeras (Nueva Zelanda, Alaska y condado de Sonoma en Estados Unidos, etc.), la del Tatio presenta las más estrechas analogías originales con la zona de los *soffioni* de la Toscana.” Y las semejanzas geológicas entre ambas regiones también se prolongan al ámbito de la composición del vapor: “Los análisis del agua de condensación que he recibido del Ingeniero Tocchi, me han demostrado de un modo evidente la identidad de composición de los dos vapores, pues tanto en el uno como en el otro, están presentes los mismos componentes químicos, ácido bórico y amoníaco, y en las mismas proporciones, y, lo que es todavía más característico, se encuentra también una sustancia particular, orgánica, del tipo itiolítico, también presente en Larderello”.

El “memorándum” de Bringhenti -como él mismo prefiere llamarlo- aborda una breve historia del desarrollo de la industria geotérmica italiana con



*La temprana industrialización de la generación geotermoeléctrica en Toscana jamás degradó el medio ambiente. En la imagen, un saltamontes asoma sobre incrustaciones de azufre y ácido bórico, junto a surgencias de aguas termales en Larderello. Colección Fabio Sartori (Italia)*

### **Cifra “mágica” de energía**

objeto de establecer evidentes paralelos con las potencialidades del Tatio, tratando de forma concisa pero precisa los temas de disponibilidad de vapor en la mencionada zona geotérmica chilena, perforaciones, tipo de central geotermoeléctrica recomendada y fuerza obtenible.

Los números hablan por sí solos: el costo de instalación de una “central eléctrica con fuerzas endógenas” en el Tatio llegaba en 1948 a un máximo de 1.300 pesos chilenos por kW, lo que se comparaba muy favorablemente con un costo mínimo de 10.000 pesos por kW instalado en el caso de una central hidroeléctrica. Para producir 300.000 kW -la cifra “mágica” de energía que en ese momento requería con urgencia la zona central de Chile- con fuerza hidráulica, se necesitaba una inversión de 3.000 millones de pesos, costo que caía dramáticamente a 390 millones de pesos en el caso de la energía geotérmica.

Aún sumando el gran costo adicional de tener que transportar dicha energía eléctrica por cerca de 1.700 kilómetros desde El Tatio hacia el sur del país mediante “electroductos” -aquí entraban al ruedo los cálculos del ingeniero Marcello de Leva-, el total de la inversión no superaba los 1.200 millones de pesos de la época, mucho menos de la mitad de la inversión requerida por una central hidroeléctrica con la misma capacidad instalada. Incluso los sondajes adicionales que se necesitaban en el Tatio no sumaban más de 30 millones de pesos chilenos.

Plinio Bringhenti concluye su escrito señalando que “... ha sido siempre la

*disponibilidad de energía eléctrica la que ha creado el desarrollo industrial de un país (...) Terminando este corto memorándum no me queda otra cosa que confirmar nuevamente mi absoluta y profunda convicción (de) que en el Tatio existen enormes cantidades de vapor y que de ellas pueden obtenerse a costos inferiores a cualquier otro procedimiento enormes cantidades de energía eléctrica. Afortunados aquellos que lo comprendan y lo aprovechen.”*

Con una hoja de ruta tan nítidamente delineada, hubiera podido esperarse una reacción entusiasta por parte de la Corporación de Fomento y la Compañía Chilena de Electricidad. O en general, por parte de los agentes de decisión relevantes en la época. Sin embargo, nadie en Chile recogió el guante. Nadie “comprendió” y “aprovechó”.

Es difícil pensar que casi tres décadas después de la epopeya de Tocchi en El Tatio, Bringhamti y De Leva hicieran sus informes por propia iniciativa. ¿Quién o quiénes en Chile, además del ingeniero Lanús, los mandataron o de algún modo los animaron a hacerlos? Más de 70 años después, es casi imposible saberlo con certeza. Pero sea como fuere, con el nulo impacto que tuvo la iniciativa se desvaneció otra oportunidad histórica de desarrollo de la matriz energética del país.

Habría aún un nuevo episodio en 1960, cuando -a pedido de la sociedad minera chilena Santa Fe- viajó a Chile el ingeniero Remo Contini, en repre-

*Calle Ahumada en Santiago de Chile, 1940.  
Colección Museo Histórico Nacional (Chile)*



# PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA

## CON FUERZAS ENDOGENAS DEL TATIO (ANTOFAGASTA)

Informes técnicos de los ingenieros señores

DR. PLINIO BRINGHENTI Y DR. INGENIERO  
MARCELLO DE LEVA

(Introducción)

La explotación industrial de las fuerzas termo-volcánicas (endógenas) de la zona del Tatio, provincia de Antofagasta, puede constituir el punto de partida de un prodigioso desarrollo industrial del Norte de Chile. En efecto, con ellas puede generarse energía eléctrica de muy bajo costo, con procedimiento análogos a los empleados en Italia por la "Sociedad Larderello", subsidiaria de los FF. CC. del Estado y que cuenta actualmente con instalaciones electro-generadoras por 200,000 Kw. El procedimiento consiste en aplicar los chorros de vapor a turbinas de baja presión, para accionar dinamos de 12,500 y 25,000 Kw. cada una.

El costo de instalación de una Central Eléctrica con fuerzas endógenas tendría un costo máximo de 1,300 pesos, moneda legal chilena, por Kw., a la vez que una Central Hidro Eléctrica tiene un costo mínimo de \$ 10,000 por Kw. instalado. En tales condiciones, una Central de 300,000 kilovatios costaría 3,000 millones de pesos, si se utiliza fuerza hidráulica; a la vez que utilizando fuerzas endógenas, el costo sería de sólo 390 millones de pesos que con el transporte a la zona central del país puede alcanzar a 1,200 millones de pesos. Esta apreciable diferencia justificaría la construcción de electroductos para el transporte de electricidad a una distancia supe-

rior a 1,000 kilómetros, para llevarla a la zona central de Chile y al Norte argentino.

¿Cuánta energía eléctrica podrá producirse en el Tatio?

Difícil es establecer actualmente una cifra, aunque sea aproximada. Toda estimación científica requiere ejecutar unos veinte o treinta sondeos, lo que ha de significar un costo aproximado de treinta millones de pesos de nuestra moneda. La inversión de este capital, por parte de la Corporación de Fomento y de la Compañía Chilena de Electricidad, empresas distribuidoras de electricidad, sería perfectamente justificable, ya que de ello depende la posibilidad de economizar cientos de millones de pesos en la instalación de una central eléctrica que abastezca a la zona central de los 300,000 kilovatios que se necesitan con urgencia para la industria y, en general, para el consumo de la población de las provincias de Santiago, Aconcagua y Valparaíso.

Por lo demás, el capital que se invierta en las perforaciones, para establecer las posibilidades electro-generadoras de los vapores del Tatio, no sería una inversión aleatoria, porque los antecedentes que existen ya al respecto permiten asegurar que en dicha zona existe una fuerza explotable superior a un millón de Kw.



*Planta geotermoeléctrica de Wairakei, en Nueva Zelanda.*

sentación de la Consultora de Energía Geotérmica (CEG), con sede en Roma y el respaldo científico y técnico de Larderello. Contini desarrolla prospecciones y estudios geológicos y geofísicos en El Tatio y, al sureste, en el sector del Laco. Destacando en particular las condiciones favorables de El Tatio para el desarrollo de un proyecto geotermoeléctrico, la CEG entrega un informe pormenorizado a la minera Santa Fe y recomienda seguir adelante. Pero por el motivo que fuera -riesgo y altos costos, eso sin considerar el caos que provocó en el país el devastador terremoto del 22 de mayo, el de mayor intensidad en la historia humana- todavía no parecía haber llegado la hora de la tecnología geotérmica en el país. Todo quedó en nada, cerrándose un capítulo brillante y pionero en la historia de la geotermia en Chile, un capítulo dominado por los italianos, los mayores desarrolladores de la industria geotermoeléctrica en ese entonces.

## **Los que sí aprovecharon**

En contraste con el letargo emprendedor que se vive en Chile, otros países con potencial geotérmico habían comenzado a interesarse en la nueva tecnología. Y ya desde fines de los años 50 del siglo pasado, el uso de recursos geotérmicos para la generación eléctrica traspasa definitivamente las fronteras de Italia.

A lo largo de cuatro años, entre 1954 y 1958, son construidas y comienzan a operar las primeras plantas geotermoeléctricas en Nueva Zelanda, en las localidades de Kawerau y Wairakei. En 1959 entra en operación una pequeña planta experimental en Pathé, en el Estado de México. Y en 1960 Pacific Gas and Electric inicia la operación de su primera planta geotermoeléctrica comercial en The Geysers (California), localidad que en la actualidad alberga el complejo industrial geotérmico más grande del mundo. Ese mismo año de 1960, Larderello alcanza una producción anual de energía

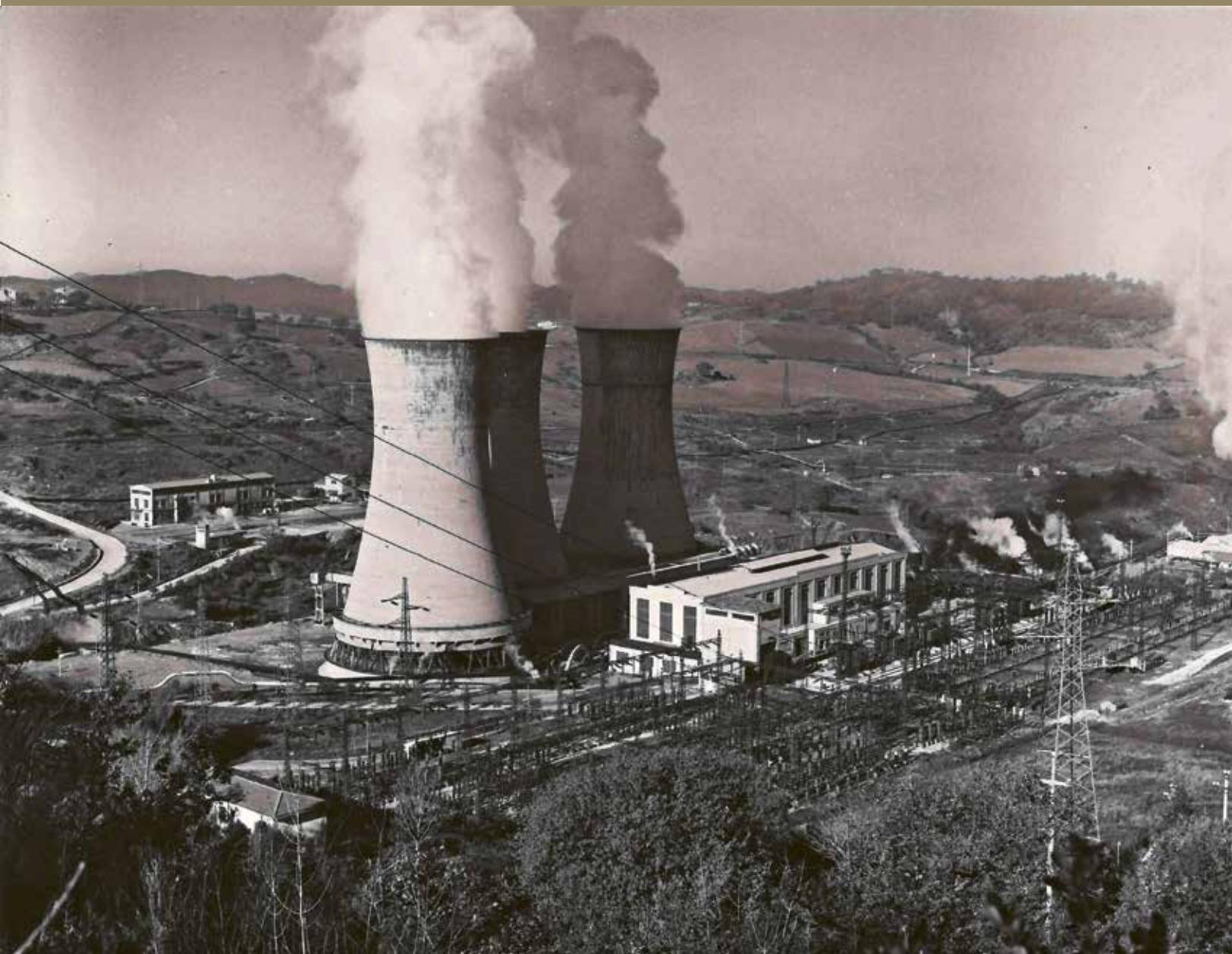
eléctrica de 2.000 millones de kWh, con una potencia instalada cercana a los 300 MW.

En los casos mexicano y estadounidense, se trataba de plantas que utilizaban directamente el vapor extraído del subsuelo, llamadas plantas “de vapor seco”, ya que los pozos geotérmicos producían exactamente eso, “vapor seco”; es decir, no había una fase líquida extraída desde los pozos junto con el vapor. Se trata de una tecnología simple pero poco común, ya que son escasos en el mundo los reservorios geotérmicos capaces de proveer directamente vapor a escala comercial. El caso neozelandés fue diferente, ya que sus plantas fueron las primeras en utilizar la tecnología “flash”, que consiste en separar el vapor de la mezcla de fase líquida (agua más “vapor húmedo” que sale de los pozos productores del reservorio). El vapor -aislado mediante unos separadores ciclónicos en presión- se utiliza para mover los turbo-generadores. Una vez condensado, se reinyecta luego del proceso en el subsuelo junto con la fase líquida (esta última directamente reinyectada en el subsuelo desde los separadores ciclónicos). El total del fluido de proceso vuelve así al reservorio para poder ser reutilizado.

El crecimiento de la capacidad instalada geotermoeléctrica a nivel global fue extremadamente gradual hasta comienzos de los años 70 del siglo pasado. El punto de inflexión llegó con la primera crisis mundial del petróleo en 1973, momento en el que muchos países comenzaron a explorar las posibilidades de recursos energéticos alternativos a los hidrocarburos, hasta entonces masivamente predominantes.

*Interior de una torre de enfriamiento en Larderello. Sus dimensiones pueden apreciarse mejor al observar la figura humana en la parte inferior. Colección Fabio Sartori (Italia)*





*Central Larderello 3, hacia 1970.  
Museo de la Geotermia de Larderello (Italia)*



*Planta geotermoelectrica Sonoma en The Geysers (Estados Unidos).  
Stepheng3.*



*Interior de la central Larderello 3 (hacia 1970). Museo de la Geotermia de Larderello (Italia).*

## Una opción oportuna

La geotermia se convirtió en ese momento en una alternativa de producción energética extremadamente atractiva, sobre todo en los países que poseen características geológicas asociadas a recursos de alta temperatura, vale decir, aquellos países con territorios situados en los márgenes de placas tectónicas y con actividad volcánica reciente.

¿Cuáles eran las razones de dicho atractivo? En primer lugar, se trata de un recurso autóctono, y en este sentido es completamente ajeno a los vaivenes del comercio exterior. Asimismo, la relación (cociente) entre la energía real generada por una central geotermoeléctrica en determinado período de tiempo (generalmente anual) y la energía generada si dicha planta hubiera funcionado a plena carga en el mismo período de tiempo, relación que se conoce técnicamente como factor de planta, es de las más altas entre todas las tecnologías de generación eléctrica disponibles. En tercer lugar, y relacionado con lo anterior, una planta geotermoeléctrica tiene escasa o nula intermitencia de generación, proveyendo un flujo de energía relativamente constante, lo que la vuelve extremadamente eficiente desde el punto de vista de la totalidad del sistema de generación eléctrica (generación de carga base). Por último, se trata de una tecnología que implica un bajo impacto ambiental.

No es de extrañar, entonces, que diversos países que poseían acceso local a recursos geotérmicos de alta temperatura decidieran sumarse progresivamente al club global de la generación geotermoeléctrica, sobre todo, como decíamos, a partir de la crisis energética que golpeó al mundo en 1973.

*Un águila sobrevuela un géiser  
en el desierto de Atacama.  
© Kseniya Ragozina.*





**EL RENACER  
DE UN VIEJO SUEÑO**

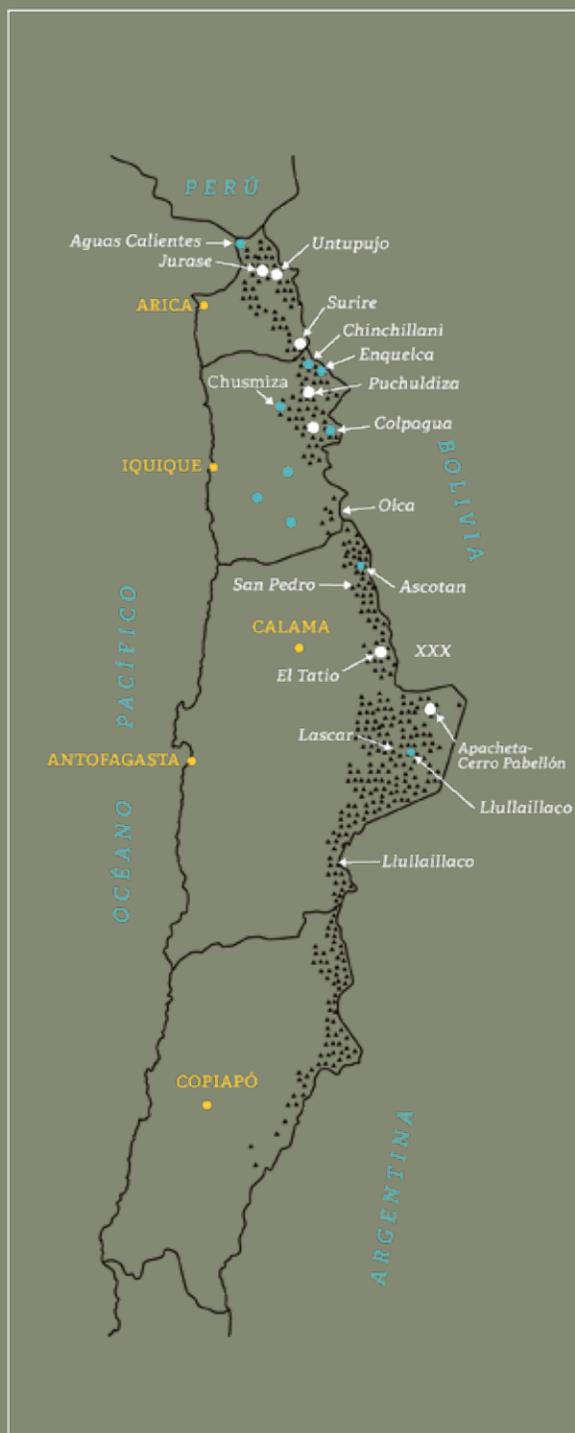


En Chile, los trabajos de Ettore Tocchi, impulsados por la Sociedad Preliminar de El Tatio, que tanto permitían esperar, condujeron sin embargo a un silencio prolongado por casi cinco décadas. Es como si esa promesa de un futuro esplendoroso, que ve el periodista de El Mercurio de Antofagasta cuando entrevista al ingeniero italiano al día siguiente de su llegada al país, se hubiese evaporado como uno de los habituales espejismos del desierto. Todo queda en nada. Como diría Nicanor Parra: total cero. Un poeta, un historiador, un filósofo quizá podrían ver en este abandono una manifestación más de algo así como el “carácter nacional”: Chile es un país, podría pensarse, en el que habitualmente los fabulosos proyectos llenos de futuro se desmoronan un buen día y pasan al olvido. ¿No fue eso, después de todo, lo que ocurrió con la magnífica riqueza que generó la industria salitrera? ¿Y antes con la del guano? Por no hablar de los proyectos políticos. En fin, como quiera que sea, lo esencial es que desde el término de las perforaciones conducidas por Tocchi en El Tatio, o sea desde 1922, la geo-

*Sala de generadores de la central hidroeléctrica Pullinque de Endesa (1962). Colección Biblioteca Nacional de Chile.*



# ZONAS GEOTÉRMICAS EN CHILE



▲ Con su nombre, volcanes activos

● 30°C - 60°C

● > 60°C

termia y su abanico de posibilidades entran en un prolongado olvido que dura hasta 1968, o sea casi cincuenta años. Mientras los países de los que hemos hablado en el capítulo anterior desarrollaban una importante industria geotérmica, en Chile se privilegian la hidroelectricidad y otras formas de energía ligadas a los combustibles fósiles.

## El regreso de la geotermia

Pero todo cambia: en 1968 el Estado chileno suscribe un convenio con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, que marca el despertar de ese prolongado letargo. Al alero de esta alianza entre Chile y el PNUD, la Corfo (Corporación de Fomento de la Producción) crea un Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica. La impulsora de la geotermia en este nuevo contexto es la petrolera estatal chilena, Enap. Ljubomir Tomasevic fue uno de los geólogos de dicha empresa que participó desde el primer momento en la reanudación de los trabajos de exploración y perforación en la zona de El Tatio. Así narra su experiencia:

“Enap fue designada como el operador del desarrollo de la geotermia en Chile. Entonces nos nominan a quince personas en Punta Arenas, todos del área del Departamento de perforaciones, el año 1969. Viajamos el 20 de julio de ese año. Me acuerdo porque hicimos escala en Santiago el día que los norteamericanos pisaron la Luna y lo vimos en el Hotel Gran Palace, en la calle Huérfanos, donde estábamos alojados. Al otro día partimos a Calama. Hicimos la aclimatación a la altura allí, porque nosotros veníamos de Magallanes, éramos chumangos, acostumbrados a vivir a la orilla del mar y a la ventolera. Después de estar cuatro días en Calama, subimos a San Pedro. Allí nos quedamos un día y luego subimos a El Tatio. Del grupo hubo cuatro personas que hubo que devolver al tiro a Magallanes, porque no soportaron la altura. El resto estuvimos con algunos problemas típicos del mal de altura, pero sobrevivimos. Así que allí nos quedamos. Así empezó la historia de la geotermia contemporánea en Chile.”

Los trabajos de exploración liderados por Enap, en el marco del convenio entre Chile y el PNUD, tuvieron lugar en el Salar de Surire, pero sobre todo en El Tatio y Puchuldiza. En Puchuldiza se construyeron cinco pozos exploratorios entre 1974 y 1977, con magros resultados. Un sexto pozo, financiado por el gobierno de Japón, mostró mayor temperatura pero no confirmó la existencia de un recurso explotable.

A partir de ese momento es en El Tatio donde se concentran los principales esfuerzos. Entre 1969 y 1971, se perforan seis pozos de diámetro reducido (de 650 a 750 m de profundidad). Luego, entre 1973 y 1974, se construyen siete pozos de producción (de 870 a 1820 m de profundidad). Estos pozos confirmaron la existencia de un recurso geotérmico de alta temperatura. El ingeniero Tomasevic vivió este proceso en primera línea:



*Sedimentos y salmuera geotérmica en El Tatio.  
Marcela Mella.*

“En Enap hicimos el desarrollo de la geotermia entre 1969 y 1974, con los aportes de Naciones Unidas. En 1974, terminamos nuestra exploración. Hicimos la primera etapa que eran los primeros seis pozos. Eso permitió concluir que era bueno el yacimiento. Enseguida pasamos a la segunda etapa, construimos los pozos de producción, desde el pozo 7 al pozo número 13, todos pozos con buen diámetro, todos productores. La inversión fue de 25 millones de dólares. No es menor, es una buena inversión que hicimos y el campo quedó desarrollado. Luego vinieron todos los informes, el del grupo de profesionales de Chile, en el que estaba la Universidad de Chile, la gente de Enap y la de Corfo. Además, el PNUD redactó su propio informe, con sus expertos, que eran todos neozelandeses. Al final, una empresa italiana hizo un último informe, después, el año 1980, para comprobar y chequear los informes previos. Ahí se comprueba que El Tatio es un gran yacimiento.”

Pero entonces ocurre el golpe de Estado.

“Nosotros para el golpe de Estado estábamos trabajando –recuerda Tomasevic–. El día que logramos entrar a Enap, no me acuerdo exactamente qué día fue, si el 15 de septiembre, o el 14 o el 20, el gerente me dice: mira, aquí tienes las llaves de la camioneta, tienes plata, tienes todo, te vas y sigues con todas las faenas que puedas seguir. Y me voy al norte. Por tierra. Llego a El Tatio y seguimos trabajando. Nosotros éramos como 158 personas en total, toda la gente de obras civiles, de perforaciones, de producción, de geología. Porque teníamos todos los grupos arriba. En esa época no se trabajaba desde la oficina. Los proyectos se desarrollaban en terreno. Tú tenías geólogos, administradores, tenías todas las oficinas en El Tatio. Todavía están ahí, la gente se preguntará por qué había tantas oficinas. Era porque todo se manejaba en terreno, no en la capital. Como se hacía en Magallanes desde siempre, que es como fuimos nosotros desarrollados e inculcados mentalmente, todo se hace en terreno, no en la ciudad. Entonces, seguimos trabajando. Nosotros teníamos el campamento en una hondonada, un día salimos muy temprano en la mañana, miramos a los alrededores: estaba lleno de ametralladoras, estábamos rodeados de militares. Pero rápidamente se dieron cuenta que nosotros estábamos desarrollando la faena. Eso ocurrió porque nosotros manejábamos explosivos, teníamos de todo arriba, en un depósito con todo declarado, con sus respectivos permisos. Cuando recordaron que estábamos arriba con esa cantidad de explosivos, subieron rápidamente. Pero no pasó nada. Los tuvimos ahí dos o tres meses, jugaban a andar cazando burros por ahí, pero nada más. Nosotros seguimos trabajando.”

En El Tatio los buenos resultados llevaron a un estudio de factibilidad, con vistas a la instalación de una planta geotermoeléctrica capaz de producir entre 15 y 17 MWe. En 1978, se llamó a licitación para contratar una firma consultora, pero el proyecto no se llevó a cabo.

Pero todo cambia y vuelve a cambiar. En 1982 se clausura el Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica. La actividad queda en manos de las universidades nacionales y del Sernageomin, que publica un Catastro Nacional de Aguas Termales y Minerales en 1997 y 1999.

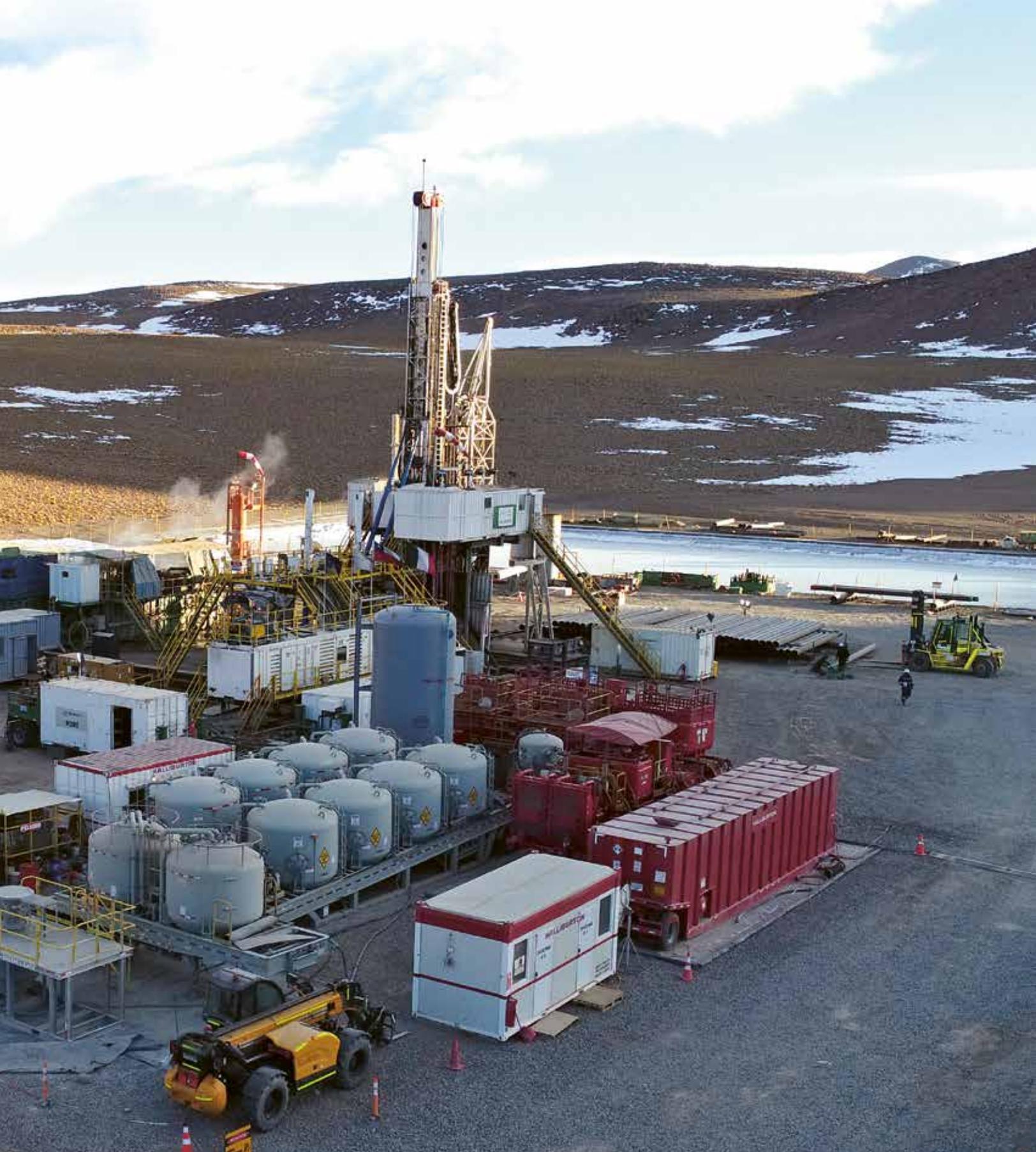
A comienzos de la década de los noventa, tras la reinstauración de la democracia, el interés por la geotermia cobra fuerza una vez más en sectores políticos e institucionales chilenos. En diciembre de 1991, el gobierno envía al Congreso un proyecto de ley para regular la exploración y explotación de recursos geotérmicos, al tiempo que Enap reanuda las tareas de exploración junto a varias empresas extranjeras. En 1993, Enap y la francesa CFG llevan a cabo un reconocimiento de áreas con potencial geotérmico en la zona central del país, escogiendo la zona de Nevados de Chillán para la realización de estudios más avanzados. Éstos culminan en 1995 con la perforación de un pozo somero (274 metros de profundidad), con el que se encuentra vapor a 198°C. El pozo es clausurado al año siguiente por razones de seguridad y el proyecto de Enap-CFG no sigue adelante. En la segunda mitad de la década, Enap reanuda actividades de reconocimiento geotérmico en asociación con el gigante estadounidense Unocal. Pero falta algo esencial para llegar más lejos: un marco regulatorio que estimule la actividad en el sector y brinde seguridades e incentivos a la iniciativa privada.

*Mediante la perforación de un pozo somero en 1995, Enap y la francesa CFG hallaron vapor subterráneo a 198°C en el área de Nevados de Chillán.  
© Marcelo Vildosola Garrigo.*





*Faenas de construcción de la central geotermoelectrica de Cerro Pabellón. Enel (Chile).*



# EL REGRESO DE ITALIA

AVISO  
POR FAVOR MANTENGA  
SU VELOCIDAD Y CALIENTE  
SU MOTOR

Finalmente -y luego de décadas de vacilaciones y retrocesos-, en 2004 tiene lugar un cambio de escenario radical en la hasta entonces trunca historia de la generación geotermoeléctrica en Chile. En abril de ese año se publica oficialmente el Reglamento de la Ley de Concesiones de Energía Geotérmica, que al proveer un marco regulador por fin posibilita y estimula la inversión público-privada en un naciente sector de energía renovable.

## **Una ley específica para la geotermia**

La Ley n°19.567 sobre Concesiones Geotérmicas había comenzado a tramitarse en 1991, y tardó más de ocho años en convertirse en ley, en enero del año 2000. Pero sólo en abril de 2004, con la publicación del mencionado Reglamento, se hizo realidad el indispensable marco jurídico para una efectiva implementación y gestión del sector geotérmico. De hecho, y a la fecha, Chile es el único país sudamericano, junto a Perú, que posee una legislación específica en relación a la geotermia.

Junto a la Ley n°19.567, entró en vigor un decreto que definía las “fuentes probables” de energía geotérmica, estableciendo a partir de un extenso y acucioso estudio del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) un total de 120 sitios distribuidos a lo largo de todo el país. Según la Ley de Concesiones de Energía Geotérmica, la exploración y eventual explotación de dichos sitios o áreas de “fuentes probables” requiere una concesión otorgada mediante un proceso de licitación pública.

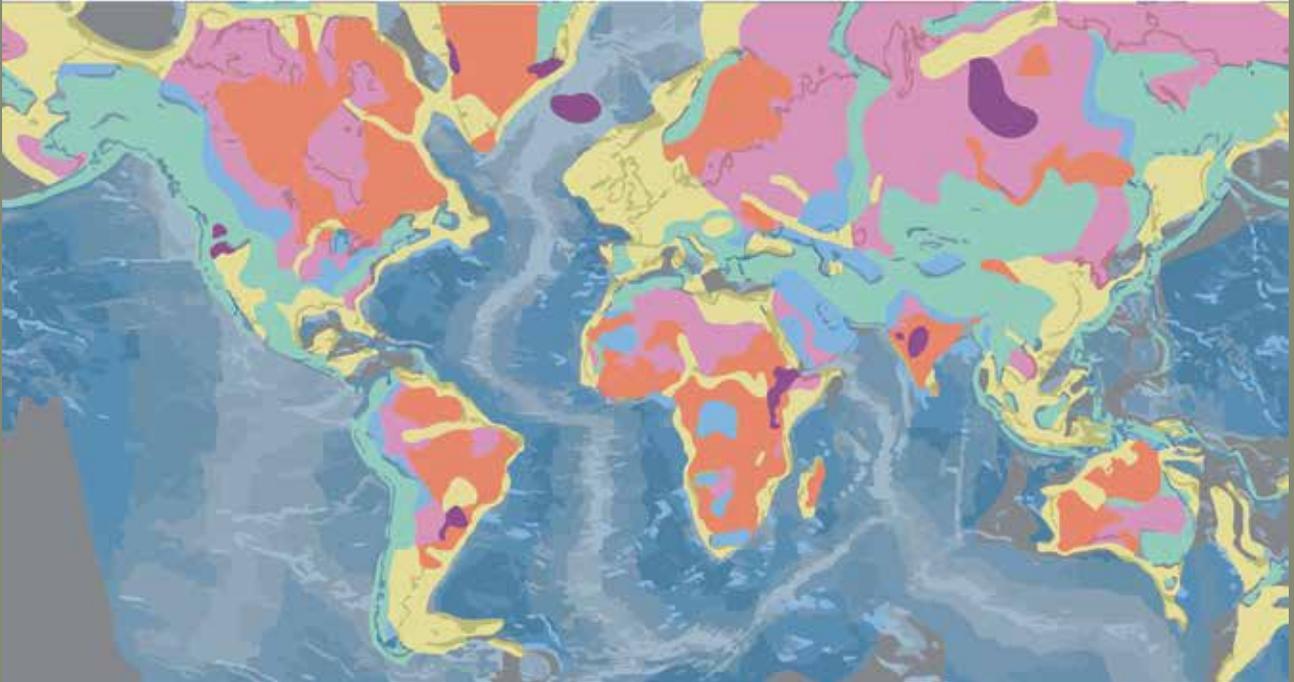
Aunque el Reglamento ha sido objeto de diversas modificaciones para superar debilidades o carencias legales y administrativas evidenciadas en años posteriores, lo cierto es que su promulgación en 2004 fue un hito de proporciones. Y las consecuencias no se hicieron esperar. Diversas empresas chilenas y extranjeras del sector energético se interesaron por las concesiones, participaron en procesos de licitación e iniciaron prospecciones en diferentes áreas del país, generando un dinamismo que -salvo en contadas oportunidades- el sector geotérmico nacional no había conocido con anterioridad. ¿Sería esta vez la vencida? ¿Habría generación geotermoeléctrica en Chile por primera vez en su historia?

Luego de la aprobación de la nueva ley, la estatal Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) estaba en condiciones de ofrecer atractivas alianzas al sector privado, gracias a su amplia cartera de prospecciones geotérmicas y su gran conocimiento y manejo de las relaciones con las instancias de decisión política. Fue en este contexto favorable que se despertó el interés de Enel, un gigante internacional del sector de la energía.

## **Accidente con consecuencias**

“A veces la estrategia de las grandes empresas se genera por accidente”, recuerda Valerio Cecchi, en ese entonces presidente de Enel Green Power -el brazo de energías renovables del gigante italiano- para Lati-

# QUÉ SON LAS GEOCIENCIAS



Fuente: USGS

Las geociencias o ciencias de la Tierra están constituidas por disciplinas de las ciencias naturales que estudian la estructura, morfología, evolución y dinámica de nuestro planeta. Su principal exponente es la geología (del griego γῆ o geo, que significa “tierra”, y λογία o logos, que implica “estudio”), que investiga la composición y estructura de la Tierra, interna y externa, y los procesos por los cuales ha ido evolucionando a lo largo del tiempo geológico hasta la actualidad.

A través de la astrogeoología o geología planetaria, las geociencias también forman parte de las ciencias planetarias, las cuales se ocupan del estudio de los planetas del sistema solar.

Las geociencias tienen una importancia fundamental por su aplicación en ámbitos como la minería, hidrocarburos, hidrogeología, geotermia,

geopatrimonio y en el estudio de desastres naturales como remociones en masa, terremotos, tsunamis y erupciones volcánicas. Juegan también un rol importante en la geotecnia y la ingeniería civil.

Las ciencias de la Tierra constituyen una herramienta indispensable en la planificación de una explotación racional de recursos naturales, y para comprender las causas que originan los fenómenos naturales que nos afectan y cómo los seres humanos influyen en la naturaleza con sus acciones.

Por otra parte, las geociencias nos permiten entender los procesos naturales que han favorecido y/o amenazado la vida humana, y su estudio está ligado tanto a la investigación de los flujos de energía en la naturaleza y al aprovechamiento de los mismos, como a la prevención de riesgos medioambientales.

noamérica. El accidente al que alude el alto ejecutivo revistió la forma de una frustrada incursión de Enel en la producción geotermoeléctrica en El Salvador. Lo que había comenzado como una prometedora expansión de un campo geotérmico ya en explotación se convirtió, tras el cambio de autoridades de gobierno en el país centroamericano, en una pesadilla corporativa. La alta rentabilidad de la producción geotérmica, que competía con un precio del petróleo de alrededor de cien dólares el barril en ese momento, hizo que sucesivas administraciones salvadoreñas, ignorando los contratos suscritos, la consideraran una caja repartidora de beneficios. El conflicto se saldó con un largo y complejo arbitraje internacional, antes que Enel pudiera dejar definitivamente atrás lo que había sido el inicio de un gran proyecto de expansión en Latinoamérica.

En la misma época, Enel tenía una presencia mínima en el mercado chileno de generación eléctrica, una pequeña participación en el subsector hidroeléctrico originada en la propiedad de la planta de pasada Pullinque y la central Pilmaiquén, ambas en la zona sur del país. Con el agravante de tarifas muy bajas, cercanas a los 35 dólares el megavatio hora, la situación parecía aconsejar a la transnacional una liquidación de activos y sencillamente abandonar Chile.

“Fue la promesa de la geotermia, como también de otras energías renovables, lo que salvó nuestra permanencia en ese momento en este país -recuerda Cecchi-. A esto se sumó después la adquisición de Endesa y muchas otras cosas que hicieron de Chile un foco estratégico para el grupo, pero antes que esto sucediera diría que la promesa de la geotermia y la idea de encontrar una estrategia de expansión de la geotermia italiana en el mundo fue una combinación que hizo que dijéramos no, tratemos de ver si se puede explotar la geotermia en Chile.”

*Central hidroeléctrica Pilmaiquén.  
Enel (Chile).*





Central de pasada Pullinque.  
Enel (Chile).

Desde el punto de vista de Enel, quedaba un solo obstáculo. Resultaba indispensable contar con un socio estratégico en el sector público. “Fue entonces que encontramos al socio Enap”, dice el ejecutivo italiano.

## Crisis energética

Por parte del Estado chileno, las apuestas también estaban escalando. En 2004 se produjo la primera reducción en los envíos de gas natural desde Argentina, para los que Chile había invertido en un costoso sistema de gasoductos y con los que contaba para sostener su entonces frágil matriz energética. De hecho, se estaba a sólo cuatro años de la tormenta perfecta que significó el corte total de suministros de gas natural argentino en 2008 y una prolongada sequía que desde 2007 a 2008 golpeó con fuerza la producción hidroeléctrica (37,6% del total de energía generada en la época), obligando a una reconversión al diésel a marchas forzadas que implicó un grave impacto ambiental y una pérdida de eficiencia de un 14%.

Para Cecchi, los cortes de suministro de gas natural argentino desencadenaron una crisis que “fue un gran despertar en Chile, donde la ley del libre mercado, el *laissez faire* sin una estrategia de largo plazo, tal vez tiene una mirada corta. Tanto es así que, habiéndole cortado el gas Argentina a Chile, se encontraron en una crisis energética, y las tarifas subieron enormemente. Yo creo que superaron en algunos casos los 100 dólares el megavatio hora. Imagínense, de 35 a 100 dólares el megavatio hora... Eso hizo que a pesar de todos los riesgos que tenía la geotermia en Chile, se hiciera de alguna forma abordable el riesgo de la exploración en este país.”

La alianza ENAP-ENEL se concretó primero con la adquisición en 2005 por parte de los italianos del 51% del patrimonio accionario de la Empresa Nacional de Geotermia (ENG), y luego, en marzo de 2006, se amplió con la compra del 51% de los títulos de Geotérmica del Norte (GDN). Sólo en esta

última empresa, Codelco siguió controlando una pequeña participación accionaria. En ENG, la francesa CFG enajenó su participación y se retiró.

“Finalmente -dice Cecchi-, una vez que Enel entró, se desató la corrida a las concesiones geotérmicas. Es típico que muchas veces pasa eso en las industrias. Se llama *follow the leader*. Nosotros fuimos el líder y todos los demás siguieron atrás. Y ahí se metieron empresas serias, aventureros, especuladores... Pero nosotros abrimos el campo. Y hay que decir que fuimos pioneros también en este sentido. Varios años después, de todos los que entraron, los únicos que sobrevivimos fuimos nosotros.”

## Regreso a El Tatio

La asociación ENAP-ENEL tuvo así el camino despejado, y tomó el control de los proyectos geotérmicos más avanzados en ese momento en Chile (El Tatio-La Torta y Apacheta en el norte, y Calabozo y Chillán en la zona centro-sur), desarrollando nuevos estudios y perforaciones en esas áreas. Como era de esperar, la atención se centró en particular en El Tatio, uno de los mayores campos geotérmicos del mundo. Luego de nuevos estudios y evaluaciones técnicas y ambientales, se reanudaron allí las perforaciones exploratorias que habían sido abandonadas en 2002, cuando el gobierno decidió suspender la actividad de ENAP en el ámbito de la geotermia. Los trabajos se centraron en un área alejada al sureste de los géiseres, conocida como Quebrada El Zoquete.

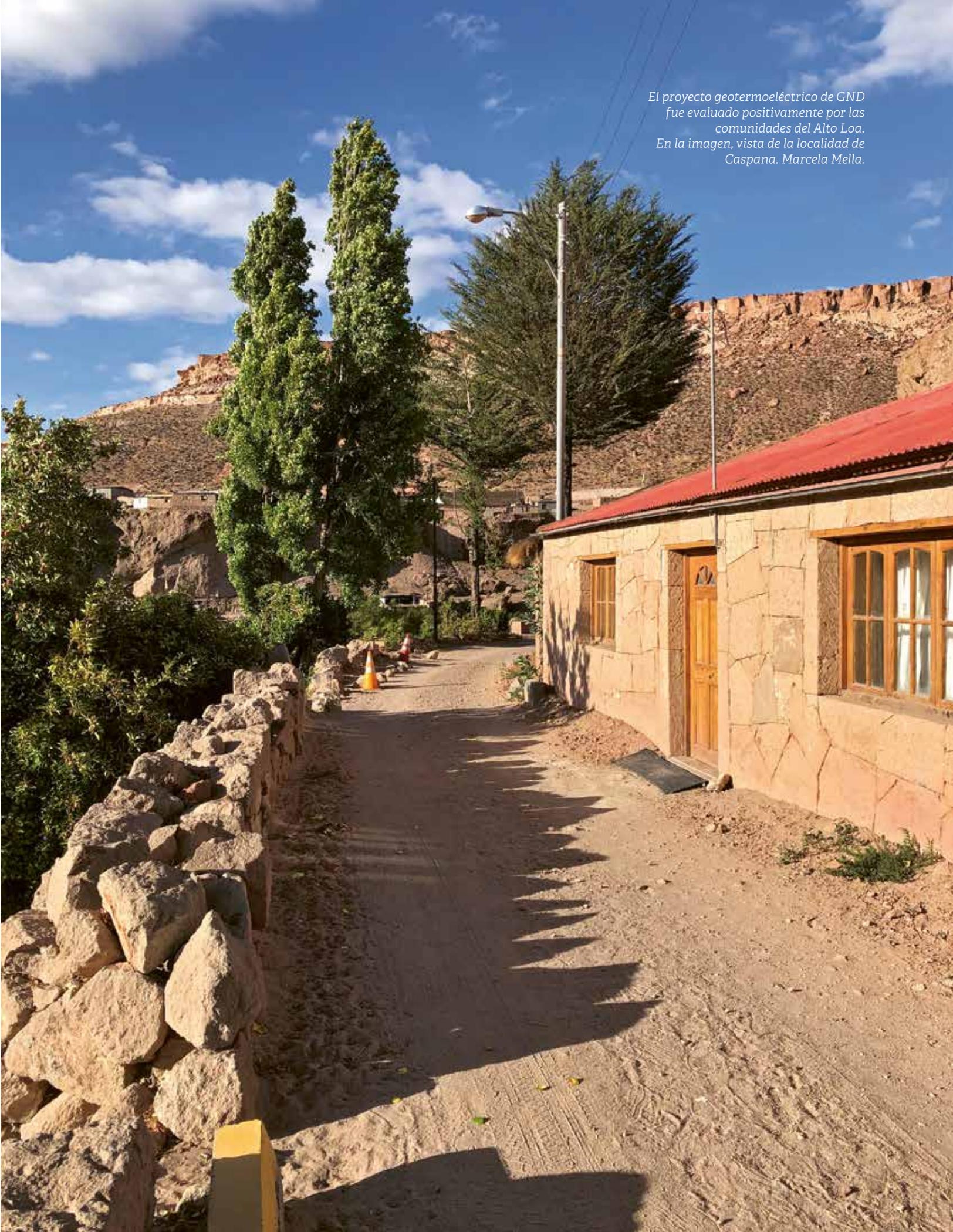
“Todos estaban de acuerdo en hacer exploración en El Tatio -asegura Valerio Cecchi-, todos apoyaron eso. Hubo muchos viajes a Italia, donde se vio que a través de la geotermia se podían desarrollar muchas industrias, no solamente energía eléctrica, sino también utilizar el vapor en viveros, cultivo de frutas, secado, cultivo de quesos... Tanto es así, que en esa época los más entusiastas respecto de la iniciativa de El Tatio eran Toconce y Caspana... La gente migraba a otros lugares. Vieron una oportunidad en la que el grupo podía contribuir en una asociación de responsabilidad social corporativa, y también para desarrollar un turismo de carácter inteligente, con toda la experiencia italiana en ese rubro... Hacer recorridos industriales y arqueológicos de interés en Toconce y Caspana, que hicieran de esos asentamientos algo muy similar a lo que puede haber en Islandia, en Nueva Zelanda, donde conviven otras industrias y la explotación geotérmica.”

## “Sandía calada”

“La gente de Enel venía con el ímpetu por desarrollar proyectos geotérmicos acá en Chile”, recuerda Carlos Ramírez, geólogo de Enap en la época, quien asegura que se quería comenzar por El Tatio en particular, porque era “una sandía calada”, que es como los técnicos denominan los proyectos que al momento de asumirse ya cuentan con importantes exploraciones y estudios previos.

“Hicieron un mapeo muy detallado del estado en que se encontraban los pozos Corfo en El Tatio -dice Ramírez-. Para determinar si podían ser

*El proyecto geotermoeléctrico de GND  
fue evaluado positivamente por las  
comunidades del Alto Loa.  
En la imagen, vista de la localidad de  
Caspana. Marcela Mella.*



aprovechados en este nuevo intento, o sencillamente había que perforar nuevos pozos para poner el yacimiento en producción eléctrica. Y se determinó entonces que en ese momento, era más conveniente perforar nuevos pozos con las tecnologías actuales y dejar estos pozos de Corfo para reinyectar. Ése es un aspecto súper importante. Después que se perfora un pozo geotérmico, si sus características resultan positivas, es necesario probar el pozo. Y probar significa hacerlo producir al menos por unos seis meses, durante los cuales se está extrayendo a la superficie vapor que se condensa, y en alguna parte hay que disponer de ese agua. Y tanto por ley como por conciencia ecológica, no se puede llegar y tirar el agua al suelo. Entonces la recomendación era que estos pozos de gran diámetro que había dejado Corfo, se ocuparan para reinyectar el fluido que iba a salir de los pozos nuevos.”

Todo marchaba “a pedir de boca”. Pero el 8 de septiembre de 2009 sucedió lo imprevisible. Luego de completarse con éxito un primer pozo nuevo de 8 MW de potencia, una falla técnica en las pruebas de producción provocó la erogación de uno de los antiguos pozos perforados por Corfo en los años 70, que estaba siendo utilizado como reinjector. Se trataba del pozo n°10, perforado entre el 4 de noviembre y el 1 de diciembre de 1973, con una profundidad de 1010 metros.

### “Algo se rompió abajo”

“Peligroso no fue -recuerda Ljubomir Tomasevic-. A mí me tocó ir cuando avisaron lo que había pasado. Estaba en Santiago y tomé el avión. Pasé a Calama a pedirle auxilio a los bomberos y subí con dos bomberos de Calama. Subimos con tres trajes especiales de asbesto, que ya no se usan, para acercarnos al cabezal, porque eso era una nube de vapor. Nadie sabía lo que había pasado. Así es que entré yo mismo con los dos bomberos que me acompañaron, amarrados con cuerdas, y fuimos y abrimos la válvula. Me di cuenta de que el cabezal estaba tumbado. Yo dije: aquí algo se rompió abajo. Pensé en un principio que era una válvula o un flanche, y abrí la válvula principal, la válvula que da hacia la vertical. Con los dos bomberos abrimos las válvulas. Nos demoramos casi todo el día. Entrábamos, salíamos... No teníamos equipo para durar mucho rato, por más que estábamos con oxígeno. Muy pesado el trabajo ése. Entonces dejamos fluyendo eso, y ahí empezó la operación para controlar el pozo. En eso nos demoramos muchos días. En armar todo. Y el problema es que no teníamos nada ahí en la zona. Hubo que traer de Bolivia camiones especiales de bombeo, hubo que traer un equipo que teníamos ahí cerca, traer elementos, estanques, hacer la línea de agua... Para armar el circo, para poder controlar el pozo... Es lo largo. Y finalmente se controló. Entonces, por qué digo que no fue peligroso... Porque fue lo mismo que ver un géiser que estuviera fluyendo.”

“Hicimos tres intentos para matar el pozo -prosigue Tomasevic-. Al tercer intento nos resultó. Ahora, el tercer intento fue re entretenido, porque estábamos allí y llegó el jefe de seguridad de Enel, y dijo que

afuera estaba la policía, la PDI, que querían entrar. Habían llegado como 15 de la PDI y querían hablar con nosotros... Los mandamos afuera a hablar y al final entraron. Mientras tanto, resultó y matamos el pozo. De repente empieza a bajar, bajar y muere. Esos gallos tuvieron la suerte de ver cómo se mataba el pozo. Entonces fue más fácil, ellos mismos filmaron. La mejor filmación que hay, si uno quiere tenerla, es la de la PDI. Porque nadie de nosotros filmó. Nosotros estábamos metidos en otra cosa... Después conversamos con ellos... Ahí descubrí yo que todos los que llegaron eran ingenieros medioambientales, de flora, de fauna... Lo encontré muy interesante, gente muy bien preparada. Entendieron todo, y después los informes fueron todos favorables para nosotros.”

## Un nuevo desafío

Así, pues, la erogación del pozo n°10 no provocó daños de consideración ni tuvo un impacto ambiental significativo, como confirmaron con posterioridad varias investigaciones independientes, entre ellas la de una comisión de expertos internacionales de Naciones Unidas convocada por el gobierno chileno, la cual terminó por recomendar la inmediata reanudación de los trabajos -que habían sido paralizados en su totalidad- con objeto de implementar la producción eléctrica del campo geotérmico.

Pero aunque en los primeros momentos no hubo ninguna reacción, cuando por fin se filtró la noticia del evento, éste recibió un tratamiento que en algunos casos llegó a ser sensacionalista por parte de los medios de comunicación, como recuerda Tomasevic: “...Dijeron que había muertos... Si tú lees la prensa de la época, las primeras noticias eran unas cosas desastrosas... Y que íbamos a arruinar todo el turismo de El Tatio, porque ese pozo estaba gastando el vapor...”

La oposición al proyecto de GDN creció incontrolablemente. “Pasamos de ser héroes a ser juzgados en la plaza pública -evoca Valerio Cecchi-. Presentaron esto como si fuese un desastre tipo British Petroleum en el golfo de México, cosa que no era para nada así, evidentemente... Se desataron las empresas de turismo, en ese sentido, en contra. Y entre una cosa y otra se congeló la exploración en El Tatio, a pesar de haber demostrado un enorme potencial.”

Ante la enorme presión mediática, social y finalmente política, GDN terminó por cancelar el programa de perforaciones y la exploración geotérmica en Quebrada del Zoquete (El Tatio) fue suspendida indefinidamente. “No recuerdo el monto exacto, pero tiene que haber 25 millones de dólares enterrados allí, entre nosotros y Enap. Esperando a tiempos mejores, si jamás llegan”, se lamenta Cecchi.

Un infortunado e insignificante accidente en las operaciones de Quebrada del Zoquete parecía estar terminando con la historia de la producción geotermoeléctrica chilena incluso antes que ésta naciera. Después de tantos esfuerzos y desvelos, ¿era eso posible?





*La erogación del pozo 10 no tuvo impactos ambientales negativos. En la imagen, un grupo de vicuñas atraviesa el sector de Quebrada del Zoquete en la actualidad. Marcela Mella.*



*Central de Cerro Pabellón al amanecer.  
Enel (Chile).*



TERCERA PARTE

**UNA PROMESA CUMPLIDA**

## **CERRO PABELLÓN: UN HALLAZGO INESPERADO**

Desde la épica expedición de Ettore Tocchi a los contrafuertes cordilleranos del desierto de Atacama y durante casi un siglo, El Tatio había estado en las mentes de todos aquellos que habían querido desarrollar la geotermia en Chile. Y no sin razón: se trata de uno de los mayores campos geotérmicos del planeta.

“Nosotros en El Tatio podemos llegar hasta el río Putana y es posible que llegemos a 400 MW. Y eso es mucho para un solo yacimiento. En un trayecto muy corto –dice un poco nostálgico Ljubomir Tomašević–. Si nosotros hubiéramos desarrollado eso, hoy día a lo mejor tendríamos 300 o 400 MW con otras condiciones, que se habrían instalado con otros precios. Estaríamos vendiendo energía baratísima. ¿Y quién iba a estar ganando? El país.”

*Durante todo el siglo XX, El Tatio estuvo en las mentes de aquellos que quisieron desarrollar la geotermia en Chile. En la imagen, paisaje de la Quebrada del Zoquete. Marcela Mella.*

Cuando se cerró la puerta del desarrollo geotérmico en la Quebrada del Zoquete, al sur del campo del Tatio, todo parecía perdido. Años de



esfuerzo y trabajo meticuloso, inversiones millonarias: todo tirado por la borda. “Nos llamaban los desaparecidos de Atacama, porque no se veía la luz al final del túnel”, recuerda Valerio Cecchi.  
¿Habría otra oportunidad para la geotermia en Chile?

## **Buscando un nuevo campo en 130 zonas**

“Fue gracias a Enel –dice Cecchi– y la capacidad de seguir adelante... Diría que también fue importante la voluntad y persistencia de los dirigentes locales. Impulsaron a seguir con tantas concesiones que teníamos, seguir con la geotermia y buscar otro campo.”

¿Otro campo? Muy bien, pero no era cosa de rastrear un nuevo campo a lo largo de miles de kilómetros en la cordillera de Los Andes. ¿O sí se rastreó?

“Lo rastreamos –asegura Gianni Volpi–. Ciento treinta volcanes, ciento treinta zonas con potencial de reservorio geotérmico, con distintos antecedentes y estudios muy básicos, que son esencialmente reconocimiento superficial, medición de fallas, geoquímica de manantiales. Y de ahí fuimos acotando los proyectos más interesantes, en base a lo que llamamos un manual de riesgo de exploración. Seleccionamos los cuatro que GDN ya tenía cuando Enel entró en la sociedad. Hay muchos parámetros: logística, la línea de transmisión, está muy alto, está muy bajo, hay vegetación, tiene un impacto medioambiental, tiene un impacto sobre la sociedad, etcétera. Entonces lo que quedó finalmente fueron 6 o 7 prospectos que llevamos adelante y con los que hicimos exploración. Estaba Quebrada del Zoquete, a algunos kilómetros del campo geotérmico del Tatio, por ejemplo, que es famoso, pero que descartamos muy pronto por la gran interferencia ambiental y social que tiene. Había proyectos en la séptima, en la octava región, que progresivamente descartamos por su compleja morfología. Uno puede pensar que un proyecto en la séptima o la octava región puede ser más fácil, porque la cordillera baja mucho, está a mil, mil quinientos metros,... Pero hay otros riesgos. Antes que nada, acceder a esos valles es mucho más complejo, hay trabajo en rocas, hay que construir puentes. Hay un riesgo hidrológico importante, porque todos los ríos tienen carácter torrencial y un régimen muy variable en función de la pluviosidad. Y tú puedes construir una instalación que después se la lleva un aluvión”.

“Finalmente, elegimos Cerro Pabellón en el campo Apacheta, aunque al ser un sistema ciego le faltaba la geoquímica y en este sentido tenía riesgo asociado, porque le faltaba una de las cuatro metodologías que nosotros usamos por protocolo para explorar recursos. Era un proyecto plano, en el medio de la nada. Una pampa completamente plana, toda la infraestructura civil a realizar era ‘barata’, entre comillas, no había problemas de vegetación. Habían pocos problemas sociales y ambientales, y finalmente se optó por él. No fueron sólo consideraciones científicas, sino un conjunto de análisis de riesgos.”

## Fases de la geotermia

### 1 Exploración

La exploración es el primer paso en la identificación de un yacimiento geotermico, para determinar su reservorio, fluido, capa sello y fuente de calor. Se divide en **exploración de superficie** y **exploración profunda**.

La **exploración de superficie** se vale de la geología, la geofísica y la geoquímica para detectar, desde el nivel del terreno y sin necesidad de perforar, la existencia y las principales características de un potencial sistema geotermico.

La **geología** estudia las cámaras magmáticas de los volcanes, el sistema de fallas y fracturas presentes en superficie y relacionadas con el reservorio y la secuencia estratigráfica (niveles de rocas uno bajo el otro) que caracterizan un determinado sitio, para ver si existen la condiciones para el desarrollo del sistema geotermico, de un reservorio, de una fuente de calor.

La **geofísica** se vale de métodos indirectos (eléctricos, sísmicos, gravimétricos, magnéticos) para tratar de definir de la mejor forma desde la superficie el volumen del posible reservorio presente en el subsuelo, establecer su profundidad mínima (el punto donde luego convendrá iniciar las perforaciones) y también confirmar si existe una capa sello por encima del reservorio que permita a la energía térmica conservarse y no escapar hacia la superficie.

La **geoquímica** es muy útil en presencia de manifestaciones termales, como géiseres, fumarolas o manantiales, que pueden ser muestreadas y analizadas. En base a la composición química de las manifestaciones, se puede reconstruir a qué tipo de reservorio geotermico están conectadas, cual es el grado de conexión y estimar la temperatura del fluido profundo, que después será interceptado por las perforaciones.

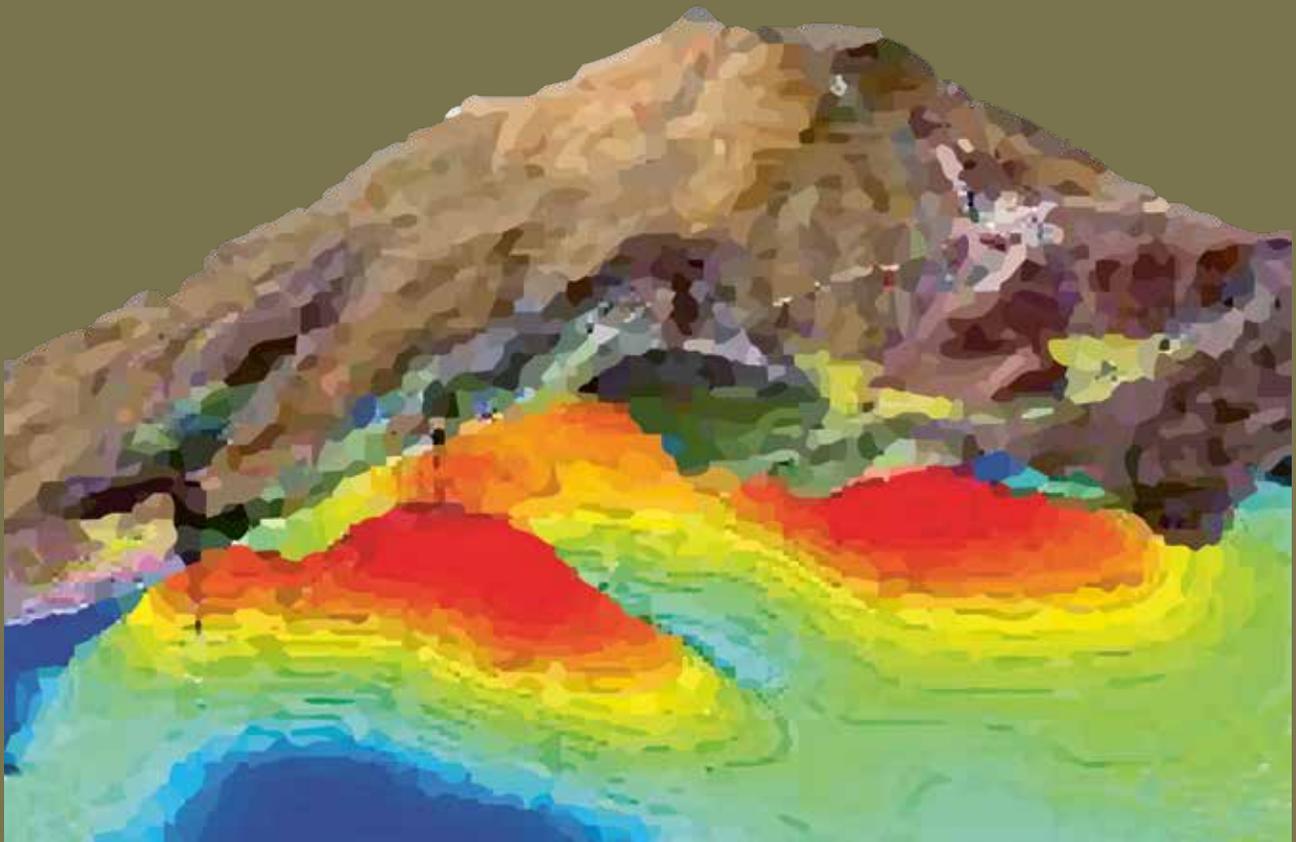
Toda esta información se reúne finalmente en un **modelo integrado tridimensional**, cuyo objetivo es reconstruir de la mejor forma posible lo que se cree es el subsuelo de una determinada zona geotérmica, y así entregar el input correcto para la etapa de **exploración profunda**.

La **exploración profunda** se vale de pozos geotérmicos de diámetro pequeño, de unas 3 a 5 pulgadas, cuyo objetivo es confirmar la existencia del recurso. Entre éstos, en primer lugar, están los **pozos termométricos**, que sólo buscan confirmar la existencia de altas temperaturas (generalmente, > 150-200 °C). En Enel Green Power se usan mucho. Alcanzan una profundidad de unos mil metros. La técnica de exploración profunda de Enel Green Power se orienta a ejecutar este tipo de pozos (de costo reducido, aproximadamente USD\$ 1 millón cada uno) y confirmar la mera existencia de alta temperatura, aun si no se inter-

cepta el fluido. Eso debido a que si existe alta temperatura, el fluido está sin duda por debajo del fondo del pozo termométrico y será interceptado mediante la perforación de un pozo convencional (de 9 a 23 pulgadas). Además, queda un activo del proyecto que finalmente, el día de mañana, alimentará la planta geotérmica.

Otro tipo de pozos utilizado en la exploración profunda son los llamados slim holes. Se trata de verdaderos pozos geotérmicos en acero y cemento, pero de dimensiones reducidas (5 a 7 pulgadas). Generalmente se perforan hasta unos 1500 m y buscan encontrar el recurso, no sólo la temperatura. Son pozos que comprueban con mayor certeza la existencia de un recurso, pero son mucho más caros (entre USD\$3 millones y USD\$4 millones) que los pozos termométricos. Su desventaja es que al final no se usarán para alimentar la planta, por su tamaño demasiado reducido.

La etapa de exploración de superficie y de exploración profunda mediante pozos termométricos dura entre uno y dos años, en función de la dificultad de acceso al área y de la obtención de los respectivos permisos ambientales.



## La tenacidad de Francesco Starace

“Todo este proyecto de Cerro Pabellón salió sin duda por el tesón de Francesco Starace (actual CEO global de Enel), que ordenó que se construyera la planta –señala Carlos Ramírez–. Querían tener una planta en Sudamérica, querían ser los primeros en tener esta planta en Sudamérica. Y el campo Apacheta es un campo extraordinario.”

Por su parte, Ljubomir Tomasevic opina que “acá hay dos factores: Cerro Pabellón se desarrolló con Enap. Nosotros teníamos allí un 49%, y para desarrollarlo nos fuimos comiendo las acciones y hoy día tenemos un porcentaje menor de las acciones en la sociedad Geotérmica del Norte. Y el resto es porque estaba Starace, que es el director máximo de Enel. Él es geotérmico neto. Es un ingeniero nuclear, pero trabajó toda su vida dentro de Enel, estuvo en el máximo puesto, pero en Enel Green Power. Y después pasó a manejar la empresa completa.”

## Descubrimiento y exploración

*“Todo este proyecto resultó sin duda por el tesón de Francesco Starace”, dice el geólogo Carlos Ramírez. En la imagen, el consejero delegado de Enel Global interviene durante la ceremonia de inauguración de la Central de Cerro Pabellón, el 12 de septiembre de 2017. Enel (Chile).*

El campo Apacheta está situado en el norte de Chile, en la zona fronteriza con Bolivia, a unos 120 kilómetros al noreste de la ciudad de Calama. Es un campo ciego, vale decir, sin manifestaciones geotérmicas superficiales. Pese a ser un lugar remoto, ya desde las últimas décadas del siglo pasado cuenta con una buena infraestructura de acceso, gracias a la presencia de áreas de extracción de aguas subterráneas que abastecen a las minas de cobre en la zona. El área con





*Pampa Apacheta es un campo geotérmico "ciego", sin ningún tipo de manifestación en la superficie.  
Marcela Mella.*

recursos geotérmicos se extiende entre los 4.500 y los 5.200 m.s.n.m., al interior del graben (fosa tectónica) de Inacaliri, en el sector oriental del Cerro Apacheta y la planicie adyacente de Pampa Apacheta.

¿Pero cómo se descubrió este campo geotérmico, si no había ninguna manifestación en la superficie? La historia se remonta hasta los años noventa del siglo pasado. “Básicamente –dice Carlos Ramírez–, lo que llevó al descubrimiento de Apacheta-Cerro Pabellón fue la información compartida por nuestro colega Leonardo Mardones, de Codelco, que en esos días estaba a cargo de la exploración de aguas subterráneas en la zona. Leonardo informó a los geólogos geotermales de la sociedad Enap-Unocal que había observado dos fumarolas remotas cerca de la cumbre del Cerro Apacheta, y que durante la exploración de aguas subterráneas, había fluido vapor de uno de los pozos de agua que habían perforado en Pampa Apacheta.”

## Hallazgo afortunado

En 1993, Mardones había hallado vapor a 180 metros de profundidad. Alentados por esta información, los geólogos de Enap-Unocal iniciaron prospecciones en el área en 1999. Para obtener muestras de gases, ascendieron hasta las fumarolas en la cumbre del cerro Apacheta, unos 4,5 kilómetros al oeste del pozo con flujos de vapor que había perforado el geólogo de Codelco. Midieron flujos de 109°C y 118°C. Por su parte, el vapor que emanaba del pozo informado por Codelco arrojó una temperatura de 88°C. Todas las muestras tomadas fueron enviadas a los laboratorios de Termochem en Santa Rosa (California), y los resultados fueron alentadores: era muy probable la existencia de un reservorio geotérmico en profundidad, con temperaturas superiores a 250°C.

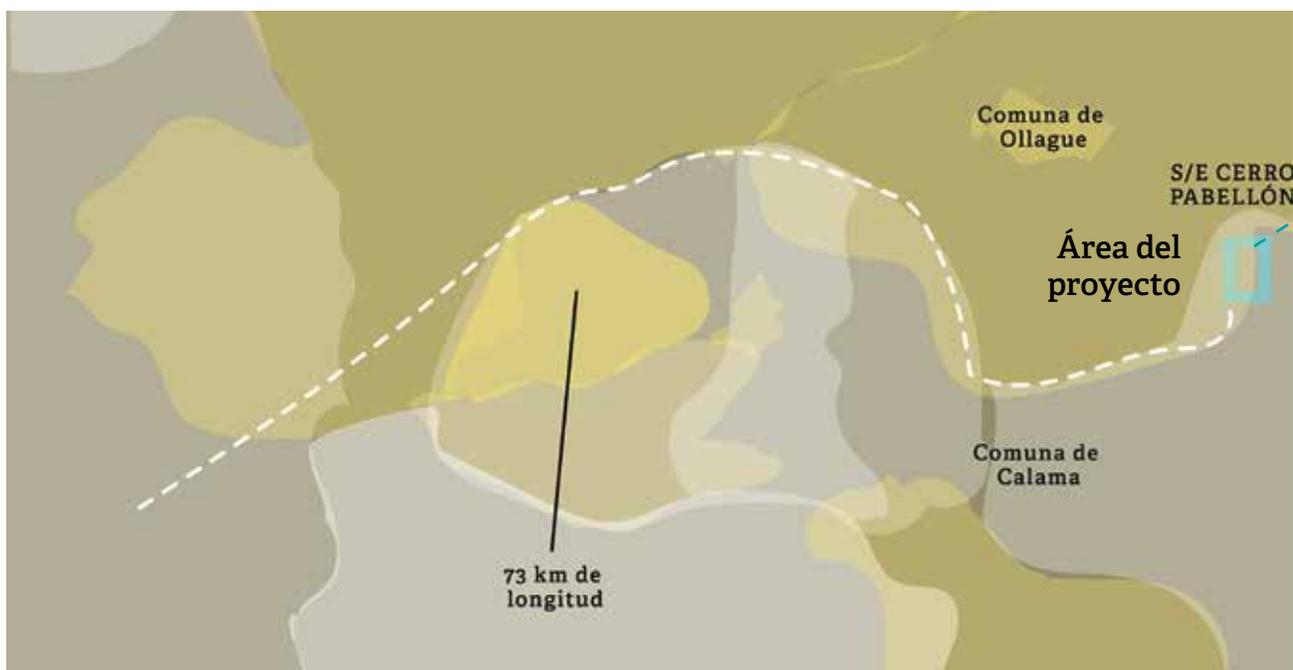
Las prospecciones continuaron a cargo de Geotérmica del Norte, recién formada por Enap y Codelco, que en 2002 obtuvo una concesión para la exploración geotérmica en la zona. Se llevaron a cabo estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos que incrementaron la evidencia de un sistema geotérmico de alta temperatura (250°C-325°C en base a geotermómetros de gases). Pero cuando ya se preparaba la perforación de pozos exploratorios, Enap tuvo que suspender todas sus actividades en el ámbito de la geotermia por orden gubernamental.

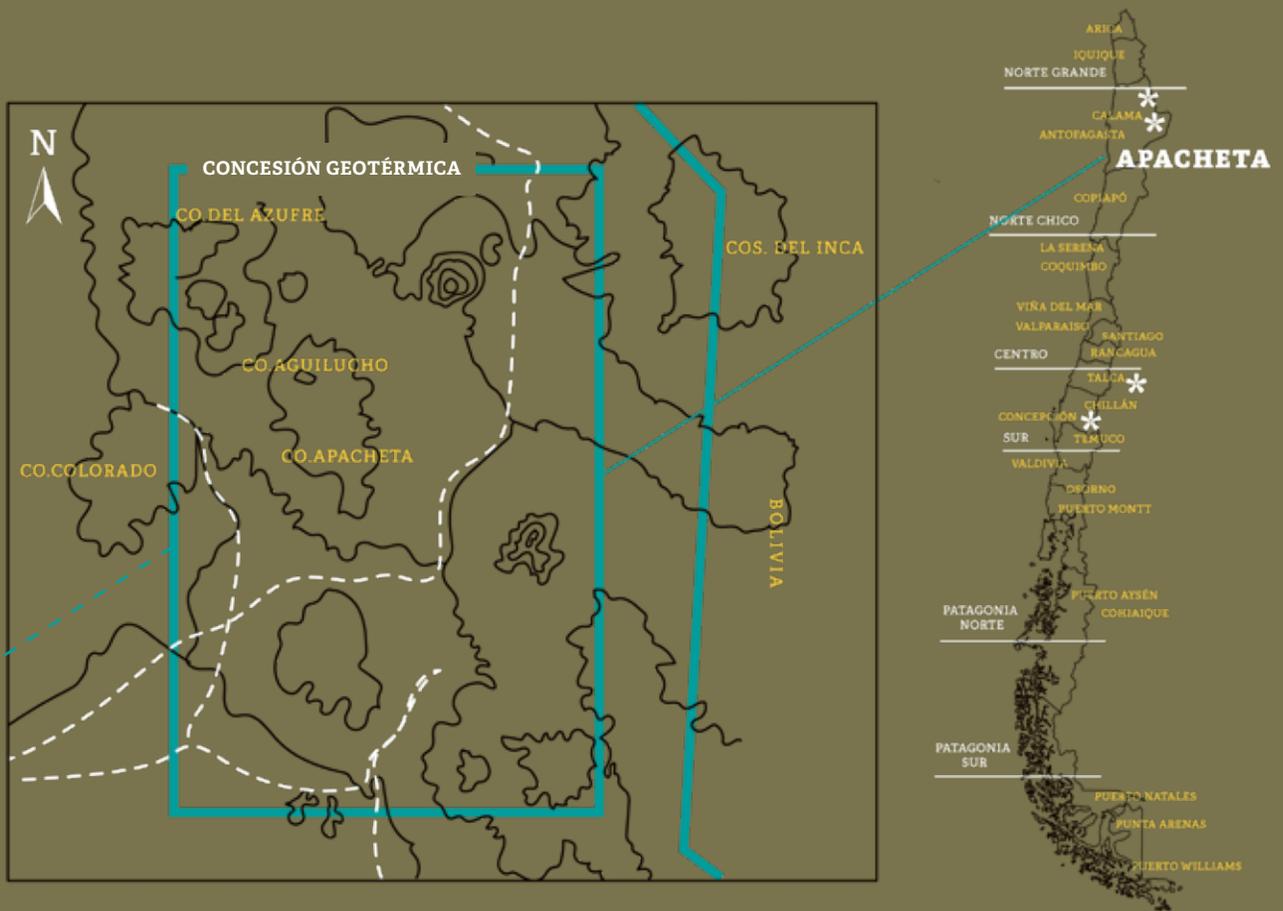
En 2006, GDN –ahora potenciada por la inclusión del gigante Enel en la sociedad– realizó estudios geofísicos y geológicos adicionales. A fines de 2007, se perforó un primer pozo de diámetro reducido en Pampa Apacheta, hallando una temperatura mayor a 200°C a 550 metros de profundidad.

## Una solución a medida para Los Andes

Gianni Volpi fue uno de los grandes protagonistas de todo el complejo proceso de exploración del campo Apacheta-Cerro Pabellón. “Hay distintas metodologías –explica–, en función de dónde está emplazado el yacimiento. Por ejemplo, toda la experiencia acumulada en Toscana, en Italia, o hasta en Estados Unidos, no nos sirvió. Porque el ambiente de rocas en general y en el fondo del reservorio, ese conjunto de rocas que contiene agua en estado líquido y cierta fracción de vapor, es distinto. Entonces, mientras en Italia se utiliza mucho la sísmica, acá, con el ambiente de roca volcánica de la cordillera andina, se ha utilizado mucho la tomografía eléctrica, que te da una imagen de la resistividad del terreno más o menos alta. Obviamente, el fluido salino a alta temperatura asigna un marco que se nota mucho donde está presente y permite delimitar el reservorio”.

Mapa de la concesión geotérmica de Apacheta





Accesos a Apacheta-Cerro Pabellón



*Vista panorámica del sector en que está emplazada la única central geotermoeléctrica de Sudamérica. Enel (Chile).*

“Y otra metodología que aplicamos fue la geología estructural. Las fallas activas que están en la zona de Cerro Pabellón se midieron, se identificaron, se midió que todavía están en micromovimiento. De hecho, hay una microsismicidad en toda la zona, la que permite que este reservorio se mantenga activo, porque si no tiende a sellarse en el tiempo por sus mismos fluidos y por los minerales de incrustación que dejan los fluidos. El hecho de que Cerro Pabellón esté emplazado en una zona tectónicamente activa es muy importante. Entonces, además de la geofísica, nos focalizamos en la parte geológica estructural, para finalmente aterrizar en la fuente de calor, que provee calor al reservorio en una zona. Claro, en Chile hay 200, 300 volcanes... Eso no quiere decir que hayan 200, 300 sistemas geotérmicos... Pero las tres cosas tienen que combinarse, y ahí justamente había la manifestación, en Cerro Pabellón, y que le da el nombre al proyecto, que es una manifestación volcánica efusiva. La datamos y tenía menos de 50 mil años. Por ende, sin duda ésa era una manifestación superficial de una cámara magmática más profunda. Y tener la fuente de calor identificada, una geofísica que funcionaba en ese ambiente de reservorio de roca volcánica, y un contexto estructural activo, nos dio aliento para arriesgarnos con el primer pozo exploratorio.

### **El pozo para salir de dudas**

“Cabe señalar que en Cerro Pabellón no existe la cuarta pata de la mesa, como digo yo, que es la geoquímica, las manifestaciones termales, que sí están presentes en El Tatio. Es un sistema completamente ciego. Porque hay una capa sello que aísla mucho el reservorio de la superficie, y entonces no se ve nada. Eso fue un desafío grande al principio, había



mucha discusión sobre si Cerro Pabellón era el proyecto más adecuado, por la falta de manifestaciones. Y lo que zanjó muchas dudas, más allá de la geofísica o de la geología estructural, que son métodos indirectos, fue la perforación de un pozo de 560 metros y de 4 pulgadas, un pozo minero, un clásico pozo de 800 mil dólares, muy barato. Como referencia, un pozo geotérmico cuesta 10 millones de dólares. Este pozo encontró fluido ya a 550 metros... Ahí nos abrió los ojos para decir sí, es un sistema ciego, pero es un sistema que existe con todos los ingredientes.”

Volpi confiesa que “no me pareció nunca un desafío tan complejo. Y de hecho, tanto en Quebrada del Zoquete como en Cerro Pabellón tuvimos éxito a la primera. Para redondear, en Cerro Pabellón, de 12 pozos perforados tuvimos 12 pozos exitosos. Pienso que es un récord mundial. No creo que en ningún otro *green field* (campo sin explotar) se haya obtenido un 100% de éxito en la perforación. Una experiencia muy gratificante, muy bonita.”

Por su parte, Guido Cappetti recuerda que “en el período 2009-2010 se perforaron los primeros 4 pozos profundos hasta más o menos 2 mil metros. Con estos pozos se demostró la presencia de un reservorio geotérmico con características muy interesantes. Es decir, con temperaturas de 260 grados celsius y elevada productividad de los pozos. Con estos datos de los pozos exploratorios comenzó a elaborarse un proyecto de desarrollo, con perforaciones de pozos de producción y la construcción de una central.”

Había llegado la hora de materializar un viejo sueño.

*Operarios de la central Cerro Pabellón.  
Enel (Chile).*





MANOS A LA OBRA

Las grandes dificultades, las imposibilidades parecían haber quedado atrás. Por primera vez en casi cien años de historia tumultuosa, el camino se veía despejado. Con los datos exploratorios “duros” en la mano, comenzó a elaborarse un proyecto de desarrollo que implicaba la perforación de pozos de producción y la construcción de una planta, al tiempo que se desarrollaban los trámites para obtener una resolución favorable de las autoridades en base a una evaluación de impacto ambiental.

## “Te faltaba el aire”

Giuseppe di Marzio, ingeniero y PhD en sistemas de energía eléctrica, fue designado por GDN en mayo de 2015 como *project manager* para la compleja labor que se avecinaba. Ya contaba a su haber con la experiencia de la construcción de una planta geotérmica de ciclo binario de 25 MW en Utah, además de la puesta en marcha de una serie de otros proyectos mayores de energía eólica y fotovoltaica en Estados Unidos y Rumanía.

“Cuando yo llegué el 2015 a Cerro Pabellón –recuerda–, era una pampa. No había nada. Claramente te faltaba el aire por la falta de oxígeno, pero también te faltaba el aire por el desafío en que uno se encontraba en ese tiempo, a 4.500 metros de altura, en medio de un cerro, un volcán. En ese momento para mí fue difícil creer que Enel podría dar inicio a un proyecto como este en unas condiciones tan extremas.”

*En Cerro Pabellón se optó por la tecnología de ciclo binario, con objeto de cumplir con los más altos estándares medioambientales.  
Enel (Chile).*

Una de las primeras decisiones que se adoptó tuvo que ver con la elección del tipo de planta que se utilizaría en el proyecto.



“No dejaba de ser un desafío instalar una planta geotérmica a más de 4.500 metros sobre el nivel del mar, con un clima extremo y lejos de la ciudad de Calama, que era donde se podían encontrar algunos de los suministros para esta etapa –recuerda el geólogo Carlos Ramírez–. Y tuvo que buscarse la tecnología de planta adecuada para aplicar en este campo. Porque hay que considerar que todo yacimiento creado por la naturaleza es un ‘animal distinto’; quiero decir, no hay disponible, en primera instancia, una planta susceptible de llegar e instalarse sin más.”

## Ciclo binario

Se optó por la tecnología de ciclo binario, en la que el fluido proveniente del reservorio se utiliza como fuente de calor para elevar la temperatura del fluido orgánico secundario, que en el caso de Cerro Pabellón es isopentano. Luego el isopentano funciona en un circuito cerrado para generar electricidad.

“ORC, Ormat Rankine Cycle u Ormat Energy Converter, son hoy en día el estado del arte para lo que son las plantas geotérmicas binarias –dice Gianni Volpi–. La historia, el gran respaldo que te puede dar una empresa líder mundial como Ormat Technologies nos hizo decidirnos por ellos. Más allá de asuntos de cotización, de presupuestos, las plantas Ormat son una garantía en este sentido. Y para escoger una planta de ciclo binario fuimos firmemente aconsejados por la Dirección General de Aguas regional, porque nuestro proyecto de Cerro Pabellón, emplazado en el desierto de Atacama, tiene muy cerca intereses de las minas, que explotan los recursos hídricos superficiales para sus procesos, y claramente iba a pisar un poco los pies al interés del país. Al ser pioneros en Chile y Sudamérica había miedo hacia la geotermia, su posible alteración de los acuíferos someros, y en un área desértica, donde hay muchos intereses de grandes empresas como Codelco o Minera El Abra, de alguna forma fuimos aconsejados por la autoridad ambiental respecto de un ciclo binario. Y en el contexto de los ciclos binarios, creo que Ormat con su ciclo orgánico es el líder mundial. Eso es lo que nos condujo hacia ellos.”

“Hay un óptimo tecnológico, que tiene que ver con la confiabilidad de los sistemas de plantas Ormat con instalaciones en varias partes del mundo –señala por su parte Giuseppe di Marzio–. Pero también tiene que ver con un contexto ambiental, en este sentido claramente ha sido un óptimo para nosotros. Existen otras tecnologías, como por ejemplo la tecnología flash, que tienen un uso invasivo de los recursos hídricos. En el caso de Cerro Pabellón, hay otros intereses del Estado respecto de la mantención de sus recursos hídricos, por lo que nuestra opción implicó un óptimo tecnológico y ambiental. Y además una planta ciento por ciento automatizada da mayores garantías de eficiencia.”

## **Fases de la geotermia**

### **2. Perforación**

Enel Green Power aplica el siguiente precepto en relación a la perforación: si hay que gastar muchos millones de dólares para perforar un pozo geotérmico seguro, en acero y cemento (del diámetro que sea, pero no un pozo termométrico), entonces es mejor evitar los “slim holes”. Después de los pozos termométricos, se pasa por lo tanto directamente a los pozos de gran diámetro (de entre 9 y 23 pulgadas y de hasta 3.000 metros de profundidad), que quedarán como activos del proyecto y que finalmente, el día de mañana, alimentarán la planta geotérmica. Un pozo geotérmico de este tipo tarda unos 3 meses en ser construido, con un costo promedio de entre 7 y 10 millones de dólares.

Entre los pozos de gran diámetro, se distinguen los pozos de exploración (los primeros 2 o 3 en ser perforados) y los pozos de desarrollo del proyecto (que siguen a los primeros si estos entregan luz verde para seguir adelante). Se hacen pozos de desarrollo en número suficiente para poder alimentar la planta que se construirá, y también para tener la capacidad de reinyección necesaria para cerrar el circuito “producción-reinyección”.

#### **Características constructivas de los pozos geotérmicos (de exploración profunda y/o desarrollo)**

Los pozos geotérmicos son perforados mediante equipos con especificaciones muy similares a los de la industria del petróleo (Figura 1), aunque adaptados a las altas temperaturas de operación de la geotermia (> 200 °C), y en casos específicos como el de Cerro Pabellón en Ollagüe, también adaptados a las bajas temperaturas ambientales nocturnas del sitio (lo que se conoce como equipo “winterizado”).

El equipo es instalado, para los 2 a 3 meses que demora la perforación de un pozo, en una explanada de unos 100 x 70 m<sup>2</sup> en promedio de superficie (es la “plataforma de perforación”).

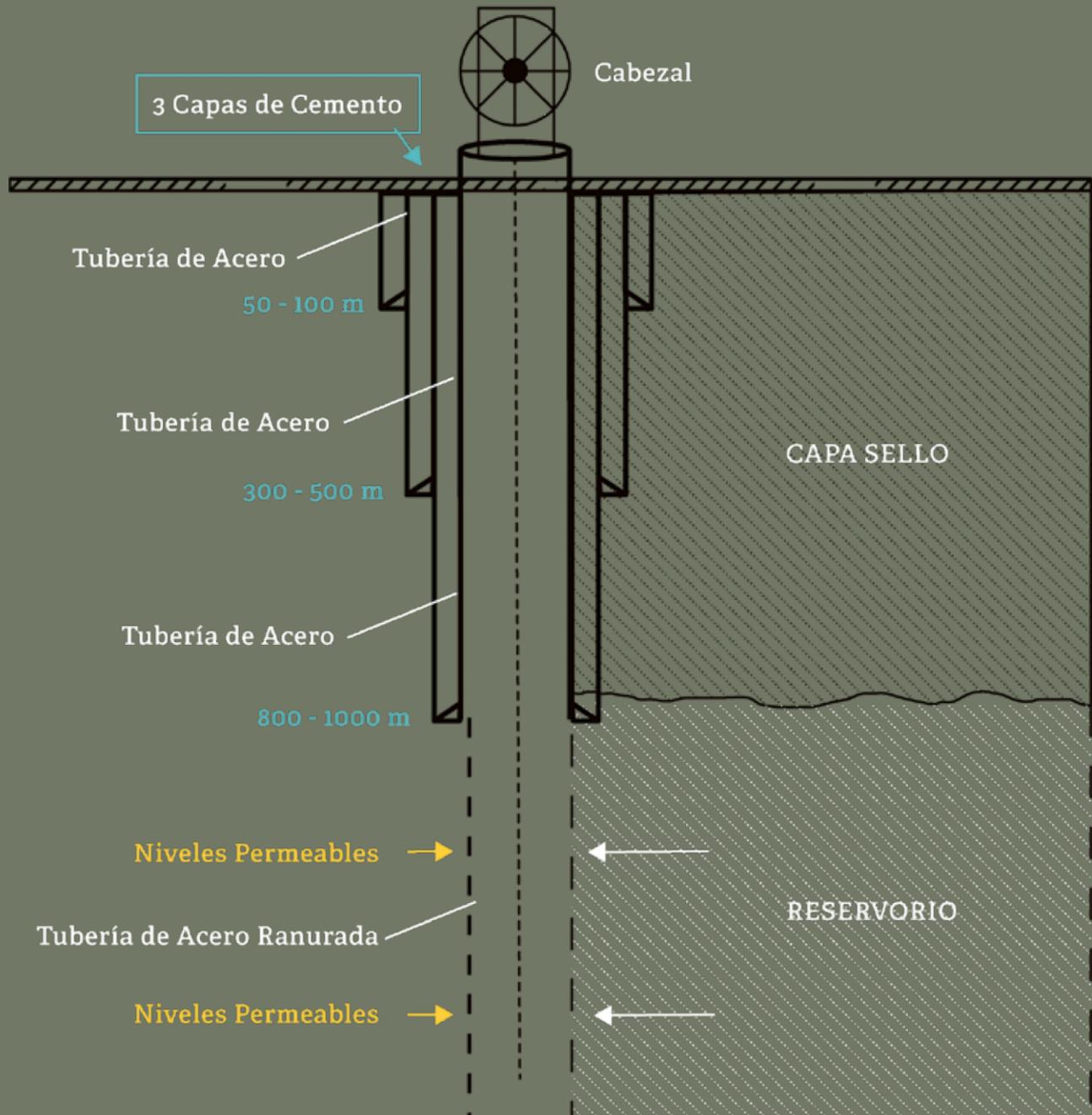
Se trata de pozos telescópicos (con diámetros de 23 pulgadas en los tramos superficiales y terminados al fondo en 9 pulgadas, conforme al tipo de roca encontrada), ejecutados con taladro, según la técnica de destrucción de núcleo. Perforando con esta técnica, los recortes de roca son llevados a la superficie y seleccionados para estudios (o dispuestos en vertederos) mediante el fluido de perforación, que es agua o lodo bentónico.

Cada etapa (conocida también como “fase” o “diámetro”) es entubada y cementada, para evitar cualquier interacción con eventuales acuíferos someros tanto durante la perforación como después, al momento de utilizar los pozos geotérmicos para fines de producción o reinyección.

Cada etapa tiene un diámetro progresivamente menor, y el equipo de perforación (barras + trepano) realiza el trabajo de profundización pasando por dentro del casing y cementos ya colocados.

Un pozo geotérmico es por ende una obra de acero y cemento que hasta alcanzar el reservorio no tiene contacto con eventuales cuerpos hídricos someros.

Sólo una vez que los pozos han penetrado el reservorio geotérmico, el agujero queda revestido con una tubería ranurada (no cementada), para permitir a los fluidos geotérmicos entrar al pozo o devolverse al reservorio, según su uso sea productivo o reinyectivo.



Esquema de construcción de un pozo geotérmico.



*Un refugio indispensable en un severo entorno natural: el campamento de Cerro Pabellón.  
Enel (Chile).*

## - 30°C en la noche

En el momento más álgido del proceso de construcción de la planta, llegaron a trabajar en el sitio un total de 1.600 personas. Y las condiciones eran extremas. “Se trabajaba con temperaturas que frecuentemente bajaban a 20 o 30 grados bajo cero en la noche –recuerda Guido Cappetti–. Y con esas temperaturas se seguían perforando pozos. Porque la actividad de perforación no se para durante la noche.”

“En mi experiencia personal, éste ha sido el proyecto más desafiante que he enfrentado, desde un punto de vista tecnológico, ambiental y logístico –dice Di Marzio–. Tuvimos que armar toda una logística para la construcción de un campamento. La primera pregunta es: ¿dónde podemos alojar? ¿Dónde podemos dejar a los trabajadores? Se construyó un campamento, un pequeño pueblo a 3.800 metros para que los trabajadores pudieran descansar en condiciones aceptables. Tuvimos que aprender mucho del contexto social, con la atención a la comunidad, pero también tuvimos que cuidar el contexto natural. Aprendimos sobre la temporada del invierno boliviano, para planificar algunas actividades. Sabíamos que en esos periodos había una disminución de las actividades, porque durante la mañana uno se despertaba y veía el cielo despejado, y a las dos de la tarde empezaba la tormenta eléctrica y entonces se paraba la faena. Todo eso lo fuimos aprendiendo durante la construcción del proyecto. Sí, nos encontramos con unas condiciones que eran muy desafiantes. Tuvimos que construir una línea de transmisión de 80 kilómetros. Eso te da la dimensión de la distancia a la infraestructura, eléctrica en este caso, la distancia a la subestación más cercana al punto de generación. Y también estuvo el tema de la construcción de los caminos de acceso. Cuando llegamos casi no habían caminos, no habían carreteras mineras. Entonces toda la logística de transportar suministros pesados, suministros tecnológicos, fue muy compleja. El resto lo fuimos aprendiendo durante estos años, desde el 2015.”

## Todo dispuesto

Una vez instalada la planta, se conectaron a ella los pozos de producción, y a su vez se conectó la central con los pozos de reinyección.

“La central es a condensación total –explica Cappetti–, es decir, que todo el fluido producido a elevada temperatura, que es una mezcla de agua y vapor, se envía a una central de producción donde el calor del fluido es transformado en energía eléctrica, y después el fluido, que es enfriado a temperaturas de 90 grados más o menos, se repone de nuevo con otro pozo al mismo reservorio profundo. El objetivo final de todo este ciclo es solamente el calor. Con esta tecnología nosotros estamos extrayendo el calor almacenado en la roca caliente del subsuelo. Es decir, contrariamente al sector petrolero, donde el recurso es el fluido mismo, petróleo, gas, ese tipo de recursos, en geotermia el recurso es el calor de las rocas. Por lo tanto, es un sistema sin

emisiones. Hay un calor impresionante almacenado en las rocas en Pampa Apacheta, donde existe un sistema volcánico de dimensiones elevadísimas. Y es también un tema de sustentabilidad, porque no es que nuestro recurso se va a acabar rápidamente. Nosotros estamos operando el campo de Larderello desde 1913. Son más de 100 años. El sistema tiene sustentabilidad en el tiempo.”

## “Decidimos producir más energía”

A fines de marzo de 2017 se activó la primera unidad de la planta, a la que siguió en septiembre la segunda unidad, cada una con 24 MW de potencia. Ya con esta primera producción, Cerro Pabellón comenzó a abastecer una demanda equivalente a 165 mil hogares chilenos con energía limpia y renovable.

“Los pozos que perforamos tienen características elevadísimas, de las más elevadas del mundo, en términos de productividad –prosi-gue Cappetti-. Y por lo tanto, se tomó la decisión de ir adelante en el sentido de producir más, porque la capacidad de los pozos ya perforados iba más allá de una producción de 48 MW.”

Se decidió así la construcción de una tercera unidad de 33 MW, que sumada a las anteriores unidades totaliza una capacidad de 81 MW en Cerro Pabellón. Con esta capacidad, se evita la emisión de un total de 280 mil toneladas anuales de anhídrido carbónico.

“Personalmente –reconoce Guido Cappetti-, ésta ha sido una experiencia única. Yo inicié mi actividad con Enel en Larderello. Después me fui un período al Tíbet, para el desarrollo de la geotermia en Lhasa. Y luego participé en proyectos en varios otros países del mundo. Y esta era la última ocasión, la más difícil. Para mí ha sido una aventura. Y te puedo decir que hemos realizado este proyecto con un equipo de personas que ha trabajado de modo muy estrecho, con un compromiso fortísimo, con un gran sentido de amistad, con una participación muy comprometida.”

## La guinda de la torta

“Para mí, éste es el punto máximo, la cumbre, el final de mi carrera, de mi período de trabajo. Comencé a trabajar en geotermia en 1976. Pero Cerro Pabellón es un proyecto fantástico, único en el mundo. Y que opera a la mayor altura en todo el planeta. Porque la que tenemos en Tíbet está a 4.300 metros y no tiene las características industriales de esta planta en Chile. Y por lo tanto para mí esto ha sido... ¿cómo se dice cuando te comes un postre, que le pones la guinda arriba, ¿no? Eso ha sido para mí, la cosa más importante de toda mi vida. Me considero afortunado. Pese a haber trabajado fortísimo, como pueden imaginarse... Pero al final la cosa ha resultado muy bien.”

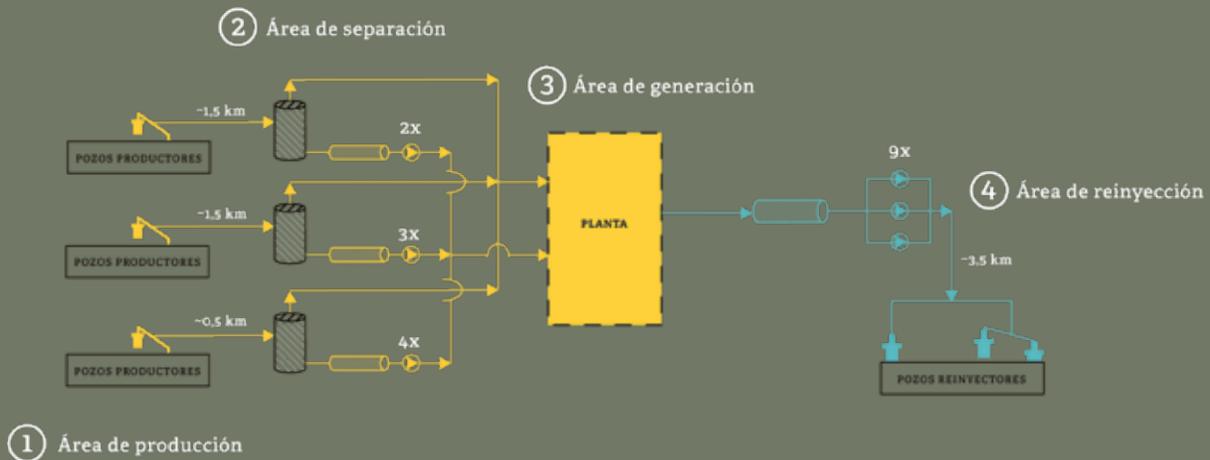


*Tuberías destinadas al isopentano (centro de la imagen), fluido secundario que posibilita la reinyección del fluido geotérmico al subsuelo y la evitación de eventuales impactos ambientales. Marcela Mella.*

## Fases de la geotermia

### 3. Construcción y operación de la planta

La forma más sencilla de esquematizar una planta geotérmica y el proceso de construirla y operarla se muestra en la figura más abajo. Se distinguen cuatro áreas principales: producción, separación, generación y reinyección.



Esquema de las principales áreas (sectores) de una planta geotérmica

### Área de Producción

El área de producción incluye la construcción y posterior operación de:

- Los pozos de producción, es decir, aquellos pozos geotérmicos que permiten extraer el fluido desde el reservorio (el fluido sale espontáneamente, no se bombea, ya que el reservorio tiene presión).
- Las tuberías de acero de 20 a 30 pulgadas de diámetro (de unos 0,5 a 1-2 km de largo) que permiten conectar los pozos al área de separación y a la planta generadora (ambas descritas más adelante).

Los pozos de producción se construyen por grupos de 2 o 3 desde un mismo sitio en la superficie (plataforma de perforación). El primer pozo perforado es vertical, los sucesivos tienen un tramo vertical de algunas centenas de metros y después se desvían con un ángulo máximo de unos 20 a 30 grados.

El fluido que sale espontáneamente desde los pozos productores puede ser agua, vapor de agua o una mezcla de las dos fases. En Cerro Pabellón se da este último caso. Por esta razón, los ductos que

conectan el área de producción con el área de separación se llaman bifaseductos.

En el cabezal de los pozos productores se ubican válvulas de varios tipos, tanto de cierre como de regulación, en su mayoría automatizadas y controladas desde la sala de control de la planta. Lo mismo vale para los bifaseductos, en los que válvulas de varios tipos permiten desviar el flujo, por ejemplo, a piscinas de almacenamiento temporal de fluidos ubicadas cerca de los pozos.

En definitiva, el área de producción es el conjunto de pozos productores, bifaseductos, válvulas y todo el sistema electrónico y de cableado que permite su operación en remoto. La construcción es por contratos EPC (Ingeniería, Adquisiciones y Construcción, por sus siglas en inglés; es una opción en la cual el contratista es responsable de todas las actividades y adquisiciones hasta la entrega del activo al propietario). La llevan a cabo empresas externas especializadas y con supervisión de personal en sitio de Enel Green Power. Suele tomar unos 2 años desde la obtención de los respectivos permisos ambientales.

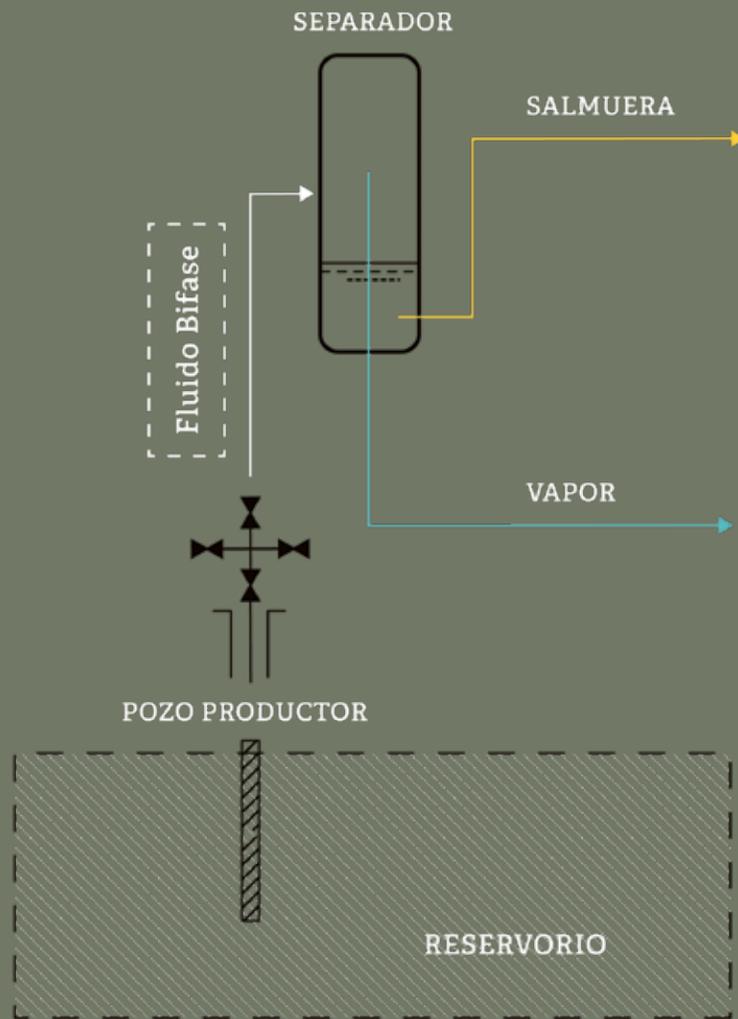
## Área de Separación

Como ya se mencionó, el fluido que sale de los pozos productores es una mezcla de agua en estado líquido (salmuera o brine) y en estado de vapor.

Debido al empuje que este fluido acuoso recibe por la presión del reservorio, el bifase se mueve sin bombas en los bifaseductos, hasta alcanzar una segunda área de la planta geotérmica: el área de separación.

Se le dice “área de separación” ya que su función es separar la fase líquida de la fase vapor, para que estas dos fases puedan ser enviadas a la planta generadora mediante ductos independientes.

El área de separación se centra en unos equipos llamados separadores ciclónicos, donde el bifase en presión ingresa, separándose su fase líquida en dirección a la parte baja del separador y su fase vapor hacia la parte alta (figura siguiente). Ambas fases proceden así separadas hacia la planta de generación.



Esquema conceptual del área de separación de líquido y vapor

Por supuesto, esta figura es un esquema. El área de separación es un sector complejo y muy costoso de la planta (varias decenas de millones de dólares), donde además del separador ciclónico existe un sistema de control del flujo y la presión tanto de la fase líquida como del vapor (con objeto de evitar excesos de caudales o de presión para los cuales la planta no está diseñada). Todo el sistema de separación y control es supervisado desde la sala de control de la planta mediante un sistema de válvulas, en su mayoría a control remoto.

Una vez separados, el líquido y el vapor tienen destinos distintos en diferentes sectores de la planta generadora (como se describe más adelante).

Para concluir la descripción del área de separación y control, es necesario señalar que ésta dispone –además de válvulas– de bombas que operan solamente en el circuito de la fase líquida separada (salmuera). Estas bombas sirven para levantar la presión de la salmuera y vencer así la resistencia hidráulica que generan los intercambiadores de calor de la planta.

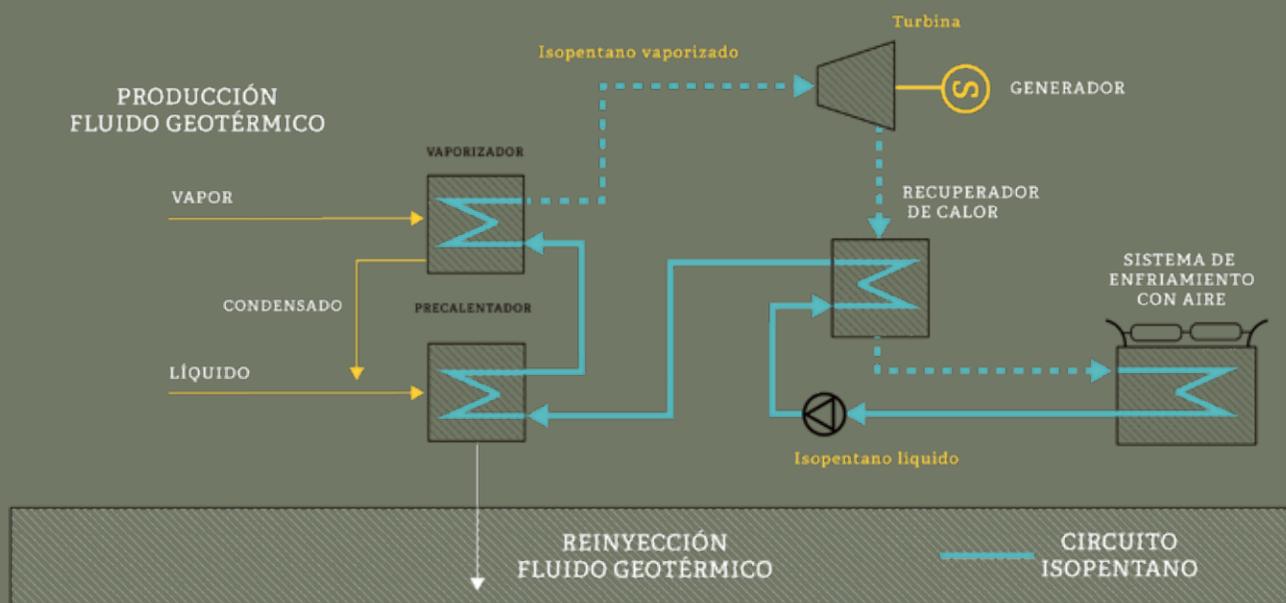
## Área de generación

La construcción del área de separación suele tomar unos 2 años desde la obtención de los respectivos permisos ambientales. Se hace mediante contratos de tipo EPC y se ejecuta en paralelo con la construcción de las otras áreas aquí descritas.

Es el corazón de la planta, donde la energía térmica contenida en el fluido geotérmico (fases líquida y vapor separadas) es convertida en energía eléctrica. El área de generación se compone de un circuito primario y un circuito secundario.

El circuito primario es el del fluido geotérmico (salmuera y vapor) que trae consigo la energía térmica.

En el circuito secundario circula el fluido que recibe la energía térmica, se vaporiza, se expande y finalmente mueve el turbo-generador. Este fluido es un hidrocarburo ligero con baja capacidad térmica y punto de ebullición. En el caso específico de Cerro Pabellón, se trata de isopentano.



Esquema conceptual del área de generación de una planta

Como se advierte en la figura, el vapor y la salmuera separados (líneas amarillas) ceden su energía térmica al isopentano (líneas celestes) mediante dos tipos de intercambiadores de calor: el vaporizador y el precalentador.

El vapor cede su energía térmica, condensándose progresivamente (a temperatura constante) y siendo sucesivamente reincorporado al flujo de la salmuera ("líquido" en figura superior).

La salmuera cede su energía térmica bajando progresivamente su temperatura. Tanto el vapor como la salmuera ingresan en los intercambiadores de calor a unos 160 °C.

Finalmente, sólo la fase líquida sale de los intercambiadores de calor, a una temperatura de unos 90°C. El circuito secundario (el del isopentano) se encarga de mover el turbogenerador. El isopentano en estado líquido circula a una temperatura de unos 48 °C, y es calentado pasando por el precalentador y por el vaporizador, vaporizándose y expandiéndose hasta alcanzar unos 155°C de temperatura. El isopentano en estado líquido circula a presiones de entre 20 y 22 bares.

Tanto el circuito primario como el secundario son circuitos con presión que disponen de bombas y válvulas. Todo el proceso es operado y monitoreado desde la sala de control.

Existe la posibilidad de «bypasear» el vaporizador, el precalentador o ambos, mediante sistemas de válvulas. También el circuito secundario tiene bypass que controlan el caudal de isopentano que entra en contacto con la salmuera y el vapor, respectivamente. Eso con objeto de tener siempre la posibilidad de optimizar el rendimiento de la planta.

Cabe señalar que el circuito de isopentano es enfriado desde los 150°C (salida desde el turbo generador) hasta los 48°C (entrada en el precalentador) mediante un sistema de torres de enfriamiento con aire (ventiladores).

La construcción del área de generación suele tomar unos 2 años desde la obtención de los respectivos permisos ambientales. Se hace mediante contratos de tipo EPC y se ejecuta en paralelo con la construcción de las otras áreas aquí descritas.

## Área de Reinyección

A una temperatura de unos 90°C y una presión de unos 5 bares, el fluido en fase líquida que sale de los precalentadores es dirigido hacia el área de reinyección. El tramo de tubería que transporta por unos 2 kilómetros este fluido hasta los pozos reinyectores es un acueducto en presión.

Desde la sala de control se puede manejar la presión de reinyección, ya que antes de llegar a los pozos de reinyección el fluido pasa por un sistema de bombas que actúan en paralelo. La presión del fluido

reinyectado puede elevarse hasta los 25 bares, en caso de ser necesario. El esquema de un pozo de reinyección es idéntico al de un pozo de producción. La única diferencia es que en este caso el fluido entra al reservorio y no sale de él.

Con objeto de flexibilizar la operación de la planta, las plataformas de reinyección también disponen de piscinas de almacenamiento temporal para descargar el agua, permitir el mantenimiento del sistema de bombeo de reinyección o hacer pruebas con sondas al interior de los pozos.

Estas piscinas no suelen utilizarse durante la operación normal de la planta, sino prioritariamente durante actividades de mantención de la misma.

Que cada plataforma de pozos disponga de una piscina de almacenamiento temporal de fluidos a usarse en caso de necesidad es indispensable para flexibilizar la operación. Por ejemplo, durante las paradas de la planta o durante pruebas periódicas de descarga de los pozos para medir sus parámetros físicos (presión, temperatura, caudal) y químicos.

El fluido descargado a las piscinas es continuamente bombeado a la reinyección, «bypaseando» en este caso la planta generadora (se enfría mucho, alcanzando temperaturas de 40 a 50°C, y no es útil para el proceso productivo).

Un elemento a mencionar muy importante durante la operación es que no es conveniente cerrar los pozos productores, a menos que la planta entre en estado de mantención por períodos largos (semanas o meses). Al ser obras de acero y cemento, abrir y cerrar pozos repetidamente puede ser dañino para su integridad, debido a la diferente dilatación térmica de estos dos materiales constructivos.

La construcción del área de reinyección suele tomar unos 2 años desde la obtención de los respectivos permisos ambientales. Se hace mediante contratos de tipo EPC y se ejecuta en paralelo con la construcción de las otras áreas descritas.

*La renovada iglesia de Ollagüe.  
Enel (Chile).*



A photograph taken from a low angle, looking through a large, rustic stone archway. The arch is made of dark, weathered stones. Through the arch, a bright blue sky is visible. In the background, a long, low wall made of rough-hewn grey stones stretches across the frame. To the left, a portion of a brick church tower with a white cross on top is visible. The foreground shows a paved area with a pattern of light-colored stones. The overall scene is bright and clear, suggesting a sunny day in a high-altitude or arid region.

**GEOTERMIA Y CULTURAS:  
COMUNIDADES Y TERRITORIOS**

Las relaciones con las comunidades, en particular con las del Alto Loa, se establecen desde el inicio del proyecto de exploración y luego de explotación de la geotermia en la región.

## Primeros contactos

“La necesidad de entrar desde un comienzo en relación con las comunidades se fundamenta en el hecho de que la geotermia es una ciencia que no se manifiesta. No es viento, no es sol, es algo escondido, que se genera bajo la tierra –explica Antonella Pellegrini, gerenta de Sostenibilidad de Enel Chile–, y para las comunidades atacameñas la tierra tiene un significado importante en su cosmovisión. Nosotros detectamos desde un principio que esta brecha entre un proyecto fundamentado en una ciencia, con un alto despliegue de tecnología, y las comunidades con sus saberes y culturas ancestrales, habría podido generar asimetrías de información importantes que se hubiesen transformado en un escollo para la buena implementación del proyecto. Entonces comenzamos muy pronto a socializar, primero la empresa, Enel Green Power, y luego el proyecto, en estas comunidades. Ese primer proyecto consistía en explorar las posibilidades de la geotermia en un campo que se encuentra en el área de una concesión turística otorgada por el Estado chileno a las comunidades de Toconce y Caspana. Estas dos comunidades fueron el primer núcleo con el que comenzamos esta conversación, que se ha mantenido desde hace quince años hasta la fecha.”

Gonzalo Salamanca, gerente de Relaciones Externas de Enel Green Power Chile y Países Andinos, es uno de los profesionales que abordó desde un principio la tarea de acercarse a las comunidades, establecer relaciones con ellas y crear un sistema de entendimiento. “Enel tenía un proyecto para explorar las posibilidades de la geotermia en la zona de El Tatio, en la Quebrada del Zoquete, que es la misma zona en la que Ettore Tocchi demuestra que hay vapor en el año 1922. Pero faltaba entrar en relación con las comunidades, socializar el proyecto con ellas, obtener su aprobación y en lo posible, asociarlas.”

## De Atacama a Toscana

Antes de la perforación del primer pozo en la Quebrada del Zoquete, en la fase de socialización del primer proyecto, en los alrededores de El Tatio, bastante antes ni siquiera de concebir Cerro Pabellón, los profesionales de Enel Green Power se acercaron a las comunidades con un abierto espíritu de conocerlas. “Tú no puedes decirle a una comunidad que vas a construir un proyecto industrial en sus territorios, que es como su casa, sin establecer con ellos una relación auténtica –puntualiza Gonzalo Salamanca– y para ello tienes que conocerlos, saber quiénes son.” Esto los llevó a participar en varios “pagos a la tierra” y sobre todo en la tradicional ceremonia de la limpia de canales, que es la ceremonia más importante de dichas comunidades. “Los miembros de la comunidad abren las compuertas de los canales al amanecer, una vez que han sido limpiados –cuenta Salamanca– y entonces cantan unas canciones en kunza, la lengua originaria del pueblo atacameño, de las

que ellos en la actualidad comprenden algunas palabras y otras no. Es un ritual ancestral y el hecho de que nos hubiesen invitado a participar con ellos cimentó desde ya una relación de confianza. Enseguida, como la geotermia es un constructo, algo difícil de entender, lo primero que planteamos fue llevar a los dirigentes de las comunidades de Toconce y Caspana a Toscana, donde se encuentra el mayor desarrollo geotérmico de Italia, concretamente en Larderello. La idea era mostrarles a los dirigentes comunitarios cómo la geotermia puede convivir –en una región de alto valor cultural– con la cultura vitivinícola, el arte, la arquitectura, la artesanía, sin alterar ni el paisaje, ni las actividades productivas. Y esta es la mejor prueba de la sostenibilidad de la geotermia. Pero además, lo interesante es que en Toscana se pueden entender muy fácilmente todos los otros usos del calor, desde el uso residencial hasta los viveros, la fabricación de quesos o de cerveza.”

### **Las propias comunidades monitorean**

“Ese viaje permitió que los dirigentes comunitarios comprendieran in situ lo que les proponíamos hacer en el futuro. La primera inquietud de ellos era que les garantizáramos que las exploraciones no iban a afectar a los géiseres de El Tatio (aunque la exploración tenía lugar seis kilómetros más abajo). Lo que hicimos entonces fue crear un programa para que ellos monitorean directamente la altura y la temperatura de las manifestaciones de El Tatio. Y al mismo tiempo,



*La necesidad de comunicar a las comunidades las características de un nuevo proyecto geotérmico generó una “conversación que se ha mantenido desde hace quince años a la fecha”, señala Antonella Pellegrini, gerenta de Sostenibilidad de Enel Chile. Enel (Chile).*

le pedimos a los geólogos que les enseñaran a identificar las manifestaciones de calor: géiseres, pozas de barro, aguas burbujeantes... Hay más de quinientas manifestaciones repertoriadas en El Tatio. Este trabajo, totalmente prospectivo (todavía no habíamos subido ni una sola máquina al terreno), fue realizado por las propias comunidades. Esto permitió que las personas de estos territorios supieran, en primer lugar, lo que tenían y, en segundo lugar, que pudieran medirlo y advertir las variaciones en tiempo real.”

Antonella Pellegrini agrega: “Las relaciones con las comunidades de Caspana y Toconce se han ido cimentando a través del tiempo y son de respeto y confianza mutuas, tanto es así que cuando tuvimos el incidente que nos hizo decidir el abandono del proyecto de El Tatio no se generó un conflicto con las comunidades, sino una solicitud de aclaraciones, querían entender lo que había pasado, pero no fue ni mucho menos el fin de la geotermia, ni de la relación de Enel Green Power con las comunidades.” ¿Y qué había pasado? “Se rompió un cabezal de un pozo, producto de la presión –explica Gonzalo Salamanca–, ese incidente tuvo como consecuencia el cierre del pozo y aunque una comisión del PNUD determinó posteriormente que no había habido daño ambiental alguno (lo que sale es vapor y material calcáreo) se decidió el fin de la exploración en esta zona.”

## Diseño conjunto

“Entonces comenzamos a desarrollar el proyecto de Cerro Pabellón – cuenta Antonella Pellegrini– y esa era otra área, el proyecto de línea, de setenta kilómetros, pasaba a lo largo de un territorio indígena integrado por más o menos seis comunidades. La Conadi nos indicó reconocer la demanda indígena y construir junto con las comunidades el perímetro de pertinencia cultural del territorio. Y eso hicimos. Diseñamos con ellos todo el perímetro, considerando las diferentes demandas que ellos tenían, elaboramos un mapa con base en lo que nosotros pudimos efectivamente identificar mediante una evaluación de impactos del proyecto. Y a partir de ahí comenzamos una conversación sobre el diseño del proyecto. Cerro Pabellón no es un proyecto que nace únicamente en los departamentos de ingeniería de las oficinas de Enel Green Power en el centro de Santiago, o en las de Pisa, en Italia. Cerro Pabellón es un proyecto que nace en terreno, de acuerdo con las comunidades. Hemos cambiado el diseño del proyecto, especialmente en la línea de transmisión, porque las mismas comunidades nos hicieron notar que había unos tramos de la línea que impactaban su territorio en unos hitos que no teníamos que impactar.”

## Creación de valor

“La conversación continua y ese codiseño final del proyecto fue la clave para implementar lo que ha sido en la práctica un proyecto consensuado. Y no sólo consensuado, sino que también ha llevado valor a las comunidades. Cuando entramos en la dinámica de la construcción, una vez que habíamos solventado el tema de los impactos, haciendo



*La necesidad de nuevos servicios que ha generado Cerro Pabellón ha beneficiado directamente a diversas comunidades del Alto Loa. Enel (Chile).*



*La nueva disponibilidad de energía durante las 24 horas ha permitido que las mujeres accedan a atractivas oportunidades laborales sin verse obligadas a dejar sus antiguas ocupaciones.  
Enel (Chile).*

por ejemplo los cambios pertinentes en la línea de transmisión y en el diseño de la ruta que íbamos a ocupar, nacieron oportunidades, porque un campamento que se establecía en un área determinada, provisto de una línea de transmisión que abarcaba setenta kilómetros, necesitaba servicios, más allá de la mano de obra, y las comunidades estaban interesadas en ofrecerlos. Aunque inicialmente no tenían ninguna experiencia en esos ámbitos, fue muy interesante y muy lindo ver la proactividad que esa inclusión generaba. Porque con la apertura de la empresa a la inclusión de la oferta de servicios por parte de las comunidades se revirtió completamente el mecanismo de distancia generada por los impactos de una acción industrial. En vez de distancia entre empresa y comunidades, se generó una integración y una coincidencia de propósitos. Entonces, lo que era un proyecto industrial se ha convertido en una gran oportunidad de desarrollo local.”

## **Servicios y desarrollo humano y social**

¿Qué servicios prestan las comunidades en Cerro Pabellón? “Una de esas necesidades –puntualiza Antonella Pellegrini– era la de transportar a la gente. Las personas que trabajaban en el campamento tenían que movilizarse a Calama. Entonces se armó una pyme de transporte. La otra necesidad en el campamento era la de limpieza. El tema fue

asumido por las comunidades y todavía hay empresas de limpieza que están contratadas para trabajar en el campamento. La de Ollagüe era la única comunidad que tenía derechos de agua. Se armaron, pues, dos lavanderías, que después trabajaron con el ministerio de Obras Públicas, que estaba construyendo una carretera en la zona. Tuvieron así otras oportunidades de trabajo. También hay un quiosco en el campamento. Hay que saber que el campamento de Cerro Pabellón está aislado, prácticamente en medio de la nada. Para buscar una tienda cualquiera tenías que ir a Ollagüe o a Calama, lo que significa una hora y media de auto. Pero con el quiosco se les brindó a las personas la posibilidad de tener a mano todos los artículos de primera necesidad, desde artículos de aseo personal hasta snacks y comida rápida. Esta interacción al interior del campamento cimentó una relación muy cercana entre profesionales y técnicos que trabajan en el proyecto y personas de las comunidades que también trabajan en el proyecto. Se estableció así un lazo de amistad, ya no estamos hablando tanto de contratos o de responsabilidad social corporativa, esto es algo que va mucho más allá. Se establece un contacto ético entre las personas, especialmente entre mujeres. Porque lo que no he dicho aún es que las mujeres de esas comunidades desempeñan un papel importantísimo.”

## **Protagonismo de las mujeres**

“La dinámica familiar de las comunidades del Alto Loa es que los hombres residen la mayor parte del tiempo en Calama, porque trabajan en actividades mineras. Y en las comunidades son las mujeres las que asumen la mayoría de las tareas vinculadas a la familia y la supervivencia. En su mayoría, se trata de madres solteras que han desarrollado una gran proactividad respecto de sus propios emprendimientos. Los consideran, de hecho, como la oportunidad de educar a sus hijos, de mejorar sus viviendas con sus ingresos y también de incrementar su rol dentro de las comunidades. Entonces, Cerro Pabellón ha representado un crecimiento no sólo en lo económico, sino también de desarrollo humano y social al interior de las comunidades. La mayoría de esas mujeres son en la actualidad líderes en sus comunidades, pero no únicamente porque pertenecen a las instancias directivas, sino por lo que hacen y aportan a la comunidad. Esta experiencia, en definitiva, yo creo que viene a confirmar que, al final, es fundamental la ética en lo que se hace, tanto desde la empresa como desde la comunidad. Si hay una relación ética, me parece a mí que las cosas funcionan, y funcionan a largo plazo. Si no existe una relación ética, las cosas pueden funcionar sólo para algunos, en el corto plazo, pero no para todos los actores involucrados.”

## **Dimensión ambiental**

“El otro aspecto importante –continúa Antonella Pellegrini– en esta necesidad de integración de la empresa con el territorio para que el proyecto fuera exitoso en todas sus dimensiones, no sólo en el aspecto tecnológico o económico, fue la parte ambiental. Para abordar este



ámbito, lo que hicimos fue sumar al monitoreo ambiental a personas de las comunidades, capacitadas para entender qué significa una resolución de calificación ambiental. Nosotros tenemos nuestros consultores ambientales, arqueólogos, biólogos, pero muchas veces estas formaciones y enfoques académicos no incluyen una visión ancestral del territorio. Y a veces nos pasó, no sólo en el Alto Loa, que nos dimos cuenta de que no teníamos un registro completo de los impactos que generábamos ambientalmente, que es lo que puede ocurrir si limitas el conocimiento al enfoque académico sin considerar lo que es importante para las personas que viven en el territorio desde siempre. Entonces integramos a monitores comunitarios, que acompañaron a los arqueólogos y biólogos, para tener una conciencia más holística de los potenciales impactos que podíamos generar. Hay plantas que para nosotros no son significativas, pero sí lo son para ellos. Y hay lugares que arqueológicamente no son identificados como relevantes, pero sí son lugares importantes para la visión indígena del territorio. Entonces la iniciativa va siempre en la dirección de la integración con todas las dimensiones del territorio, incluida la ambiental y la arqueológica, además de la social, la económica y de desarrollo humano.”

## **Barefoot College y “mamás solares”**

“Antonella –interviene Gonzalo Salamanca–, a propósito de eso, quería atraer tu atención sobre la iniciativa del Barefoot College y la experiencia de mujeres de las comunidades del Alto Loa que se formaron como ‘ingenieras solares’ en la India.”

“En efecto, lo de Barefoot College fue una experiencia interesante –recuerda Antonella Pellegrini–, porque es una prueba más de nuestra concepción del desarrollo como una labor colectiva, como un tejido de desarrollo humano, social, económico y ambiental. Barefoot College es una alianza de Enel con esta ONG india de nombre homónimo, cuyo objetivo es resolver el tema de la falta de acceso a la electricidad que sufren las comunidades, mediante la capacitación de las mujeres. Hay que saber que son numerosas las comunidades en América Latina que están muy aisladas de los territorios donde los Estados pueden intervenir para brindar energía eléctrica. La solución en esos lugares es que son las propias personas las que deben gestionar la provisión de energía, y eso supone que la tecnología tiene que bajar al nivel en que los usuarios puedan hacerse cargo de brindar energía a sus propias comunidades. El Barefoot College nació de esta constatación. Hay una aldea, llamada Tilonia (en el distrito de Ajmer, en Rajastán), en cuya escuela se reciben mujeres de todo el mundo para que aprendan a armar, instalar y reparar pequeños paneles solares conectados a una batería. Y las mujeres permanecen en esa escuela durante seis meses. Desde Chile, llevamos al Barefoot College mujeres de Caspana, Toconce y Ollagüe, que se quedaron en la India durante los seis meses del curso y regresaron a sus comunidades como líderes comunitarias de energía solar. Se trataba de mujeres que salían de

*Las “mamás solares” brindaron a las comunidades una nueva autonomía energética, basada en recursos renovables. Enel (Chile).*

sus comunidades por primera vez y allá, junto con otras mujeres que hablan otros idiomas, simplemente mediante una operación práctica y gestual, ellas aprendieron. Eso generó un liderazgo de mujeres que de otra manera nunca se habría podido dar.”

## **Autonomía energética**

“El grupo de América Latina estaba integrado por mujeres de nueve países, procedentes de más de cuarenta comunidades. Estas mujeres, a su regreso a Chile, instalaron equipos y electrificaron sus comunidades. Nosotros las llamamos las mamás solares. Y todavía ellas, en esas comunidades, mantienen y cuidan muy bien sus paneles. Incluso una de ellas hoy se dedica también a la mantención de la planta solar de Ollagüe, que es un sistema bastante más complejo, pues les da la posibilidad no sólo de alumbrar sus casas, sino de usar electrodomésticos y otros dispositivos. La belleza de este proyecto es que ha tenido un gran impacto en muchas mujeres y comunidades de América Latina, y es otro aspecto que se suma a la construcción continua de esta relación con los territorios del Alto Loa.”

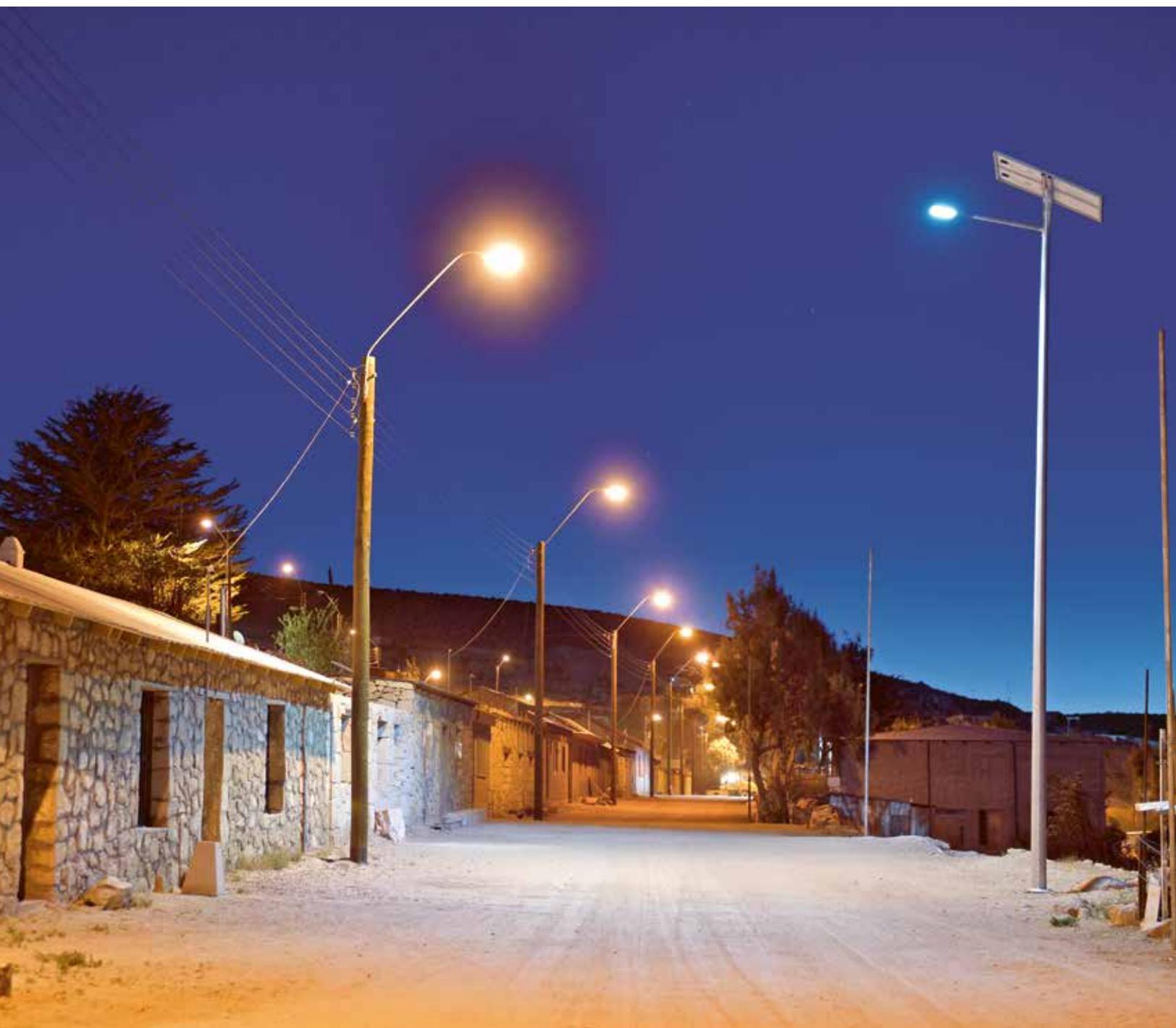
“Para entender mejor esta vía de acción –complementa Gonzalo Salamanca–, quizás sea necesario agregar que la mayoría de las demandas de las comunidades están asociadas a la energía y a las infraestructuras locales. Las comunidades, por lo general, carecen de energía, funcionan con generadores a petróleo, lo que resulta caro y contaminante. Nosotros buscamos acuerdos con las comunidades que supongan una mejora en las infraestructuras locales, en materia por ejemplo de agua potable, ganadería, con portafolios de proyectos que beneficien directamente a las comunidades, generando estrategias locales que sean sustentables, como fomentar las producciones locales o el turismo. Por otra parte, el gran desafío actual es transferir conocimientos: la pregunta es cómo colaborar en la gestión de las energías renovables por las propias comunidades, porque hoy existe un gran déficit de gobernanza, tanto a nivel de municipios como de las comunidades.”

## **Transferencia de conocimientos**

“Se trata entonces de capacitar, de formar personas. En Ollagüe, por ejemplo, implementamos una central híbrida, que funciona con paneles fotovoltaicos y una torre eólica, asociados a baterías. La idea, en el mediano plazo, es transformar la planta de Ollagüe, en asociación con el municipio y una universidad, en una escuela práctica para el conocimiento y operación de sistemas de energía renovable, fuera de la red, para comunidades remotas. Se trata de crear allí un centro de formación para jóvenes de las comunidades, de pequeña escala, para satisfacer las necesidades de pequeños poblados. Pero también hemos creado, en el parque eólico Valle de los Vientos, cerca de Calama, el Centro de Interpretación del Desierto, el CID, en el que todas las comunidades del Alto Loa están involucradas. No se trata únicamente de una interpretación del Desierto desde el punto de vista

de las energías, sino también desde la etnobotánica y la antropología. Actualmente, estamos trabajando en la asociación de las comunidades a la gestión del proyecto, concebido como un “umbral pedagógico” de acceso al desierto, como espacio geográfico y cultural. Así, tenemos energía fotovoltaica en Toconce y en Caspana, y en Ollagüe la planta híbrida que acabo de mencionar. En Caspana, además, funciona en la actualidad una planta de deshidratación y *packaging* de productos locales, asociada con un sistema fotovoltaico, porque además de las hierbas propias del desierto de altura, en esos oasis del Alto Loa se producen por ejemplo excelentes ajos, damascos y otras verduras y frutas. Y estos proyectos son más sustentables que la sola lavandería, los quioscos, el aseo o el transporte. En ellos, pensamos nosotros, reside el futuro.”

*En un proyecto de Enel, la municipalidad de Ollagüe y una universidad, la central híbrida de la localidad se transformará en una escuela práctica para la operación de sistemas de energía renovable, asegura Gonzalo Salamanca, gerente de Relaciones Externas de EGP. Enel (Chile).*



## GERMÁN GONZÁLEZ PANIRE

“Si la tierra estuviera muerta, no daría nada”



Germán González Panire es el *yatire* (máxima autoridad comunitaria) de Caspana. Tiene el rostro duro, curtido por el desierto. Es un hombre esbelto, no muy alto. Habla pausadamente, en un tono muy bajo, como si estuviese midiendo, con precisión, lo que va a decir.

*¿Desde cuándo comenzó usted a ocupar cargos en la comunidad?*

Desde el año 1985. Yo tenía unos 23 o 24 años. El primer cargo que ocupé dentro de la comunidad fue el de capitán de la limpia de canales.

*¿En qué consiste ese cargo?*

Bueno, el capitán dirige todo lo que es la limpia de canales, organiza todo. Y al final rinde cuentas a la comunidad, en una asamblea que se hace una vez finalizada la limpia. Allí se eligen también los nuevos capitanes para el próximo año.

*¿Cómo es el calendario de la limpia?*

Se empieza a trabajar el 26 de julio. Esa es la primera limpia, una más chica, si usted quiere. Después se da inicio a la limpia propiamente tal, el 15 de agosto. Se hace en dos etapas. Se parte un día miércoles con un huaqui, que es una ceremonia que consiste en pedir permiso a la tierra para dar inicio a todas estas obras. El día jueves se trabaja un tramo y otro el día viernes. Se termina el día sábado, cuando se llega arriba de la quebrada.

*¿Y dónde está el agua antes de que se suelte?*

Se deja corriendo al riego. Después hay una convivencia, alguien ofrece un almuerzo, así que sigue la fiesta.

*¿Y cuándo termina la limpia de canales?*

Se termina el día que uno entrega el cargo. El día miércoles, una vez que se han limpiado todos los canales, se reúne toda la comunidad. Entonces uno entrega el cargo. Dura una semana, de miércoles a miércoles.

*¿De dónde vienen los cantos que se cantan en esa ceremonia?*

Eso se conserva de años. Los primeros que yo conocí se sabían los cantos completos. Pero con el transcurrir del tiempo se fue perdiendo parte de ellos. También las costumbres se han ido perdiendo. Yo estuve investigando esos cantos, porque tienen mezcla de kunza, de quechua y aymara. Se escriben del mismo modo, pero la forma de pronunciar es otra. Eso confunde mucho.

*¿Qué dicen los cantos?*

Bueno, según sé, están relacionados con la tierra y el agua...

*¿Usted comprende lo que dicen esos cantos?*

No, hay ciertas personas que los comprenden aún, pero no todas.

*Usted también trabaja como médico natural. ¿Lo viene a ver la gente?*  
Sí, trabajo en una oficina, allá en Calama. Siempre me están llamando. No atiendo mucho, porque no dispongo de tiempo. Cuando tenía tiempo atendía los lunes y los miércoles. Eso es en un programa que se llama Con Salud del Pueblo Indígena. El Estado entrega recursos.

*¿Qué fue lo que hizo concretamente usted en El Tatio? ¿Cuál es su experiencia con la geotermia?*

Bueno, la geotermia estaba funcionando desde los años 60, con los proyectos de la Corfo. Pero después se paró todo eso, en la época del gobierno militar.

*Pero, ¿usted qué hacía en El Tatio?*

Más que nada íbamos a juntar yareta, que es una planta que hay en el cerro, un arbusto que se usa como combustible. Se seca por sí solo y da muchas calorías. Antes la usaban todas las mineras para sus faenas, pero ahora está protegida. Yo a los catorce años empecé a andar con animales por ahí, juntando yareta, porque era la única fuente laboral que teníamos en ese tiempo. Andaba sobre todo por el cerro El Cenizal, que está frente a El Tatio. Se criaba harto ganado en ese entonces. Ahora, la gente se dedica más a la agricultura.

*¿Y cómo comenzó su relación con la geotermia?*

Comenzó una relación más cercana cuando Enel hizo las exploraciones en la Quebrada El Zoquete, cerca de El Tatio.

*¿Y cómo fue ese trabajo, esa relación con Enel?*

Nosotros como comunidad no teníamos problemas con Enel. Pero había algunos vecinos que sí tenían ciertos miedos. Por mala información, pensaban que se iban a secar las vertientes de agua, que iban a ser contaminadas. Y hasta el día de hoy las vertientes siguen igual. O sea, el proyecto no ha afectado en nada.

*Ustedes como comunidad lo pudieron comprobar.*

Así es. Nosotros mismos, con Enel, monitoreamos los géiseres en temperatura y altura, para saber si había afectación, y no había ninguna. Hasta ahora no ha habido ninguna repercusión. Y todos contentos.

*¿Cuánto duró ese proceso con Enel?*

Duró bastante tiempo. Yo estuve dos años, pero antes hubo otros dirigentes. Yo diría que en total duró unos cinco años.

*Ustedes cumplieron su función de velar porque no se le hiciera daño a la tierra.*

Así es. Porque nuestra creencia es que todo viene de la tierra. Te da de comer, de beber. Y después todo vuelve a la tierra. Entonces uno respeta a la tierra, por el hecho de que nos da absolutamente todo. Muchos dicen que la tierra está muerta. Y la tierra no está muerta. Si estuviera muerta, no daría nada.

## CORALINA ANSA

“En este trabajo una aprende y aprende cosas”



“Soy auxiliar de aseo, de aquí de la Empresa Parhua. Ésa es la función que tengo yo, encargarme del aseo aquí en el campamento. Las oficinas de Enel, el policlínico, la garita y los pasillos. Además de los baños y el casino. Allá arriba, en la planta, igualmente: oficinas, periférico y sala de control. “

*¿Y a qué hora hacen el aseo?*

Mire, aquí en el campamento empezamos desde las seis y media de la mañana hasta como la una de la tarde. Y bueno, mis compañeras como a las nueve van para allá arriba. Como usted sabe, es media hora de viaje hasta llegar a la planta. Empiezan a las nueve y media de la mañana. Hasta como las doce y media. Después ya tienen que bajar acá para almorzar a la una.

*Entonces, ¿su jornada de trabajo es de qué hora a qué hora?*

De seis de la mañana a seis de la tarde. El turno es de diez por diez días. Diez días arriba y diez días de descanso.

*¿Usted es de Ollagüe?*

Sí, yo soy de Ollagüe. Soy indígena de origen quechua.

*Y por lo tanto habla un poquito de quechua.*

Sí, entiendo palabras y algo más, porque yo soy de madre quechua.

*Y la empresa Parhua, ¿es una empresa familiar? ¿O es una empresa de Ollagüe, integrada por miembros de la comunidad?*

No, esta empresa es de la familia. La socios son mi hermana y mi mamá. Pero trabajamos con mujeres de Ollagüe.

*¿Cuántas trabajadoras tiene la empresa?*

Por turno, somos cuatro. Tres trabajadoras de aseo y un supervisor.

*¿Y cuántos turnos hay al mes?*

Somos dos turnos. Cuando yo me voy con descanso, llega el otro turno. En total, la empresa está integrada por ocho mujeres.

*¿Desde cuándo está trabajando en esto?*

Desde que inició sus actividades Parhua acá, en el 2019. El 6 de abril.

*¿Qué ha significado en su vida esta experiencia de trabajo? ¿Ha sido buena, mala?*

Mire, por todas partes ha sido buena. Porque yo nunca había salido de mi casa, de Ollagüe, siempre había trabajado allí, con mi familia. Y ha sido una experiencia bien buena, venir a un campamento y aprender, porque aquí las cosas son todas diferentes. Y una aprende y aprende cosas. Y así igual nos sirve para ir a otros lugares, a las mineras, a prestar servicios.

*Es decir, a partir de esta experiencia con Enel, la empresa tiene la intención de expandir sus servicios a otras empresas.*

Sí, a empresas mineras. Que igual tienen convenios con nuestra comunidad: Collahuasi, Quebrada Blanca y El Abra. Igual nosotros queremos prestar servicios en esas empresas, por eso de aquí estamos sacando la experiencia. Como nos dio la oportunidad Enel, entonces...

*Ésta fue la primera oportunidad que tuvieron.*

Sí. Y es la primera vez también que yo salgo de mi casa.

*Y económicamente, ¿ha cambiado la situación de ustedes? ¿les ha ido mejor?*

Sí, porque igual tenemos un trabajo seguro, un sueldo seguro para mantener nuestra economía. Porque yo tengo una hija que está estudiando en la universidad.

*¿Dónde?*

Está estudiando en Santiago. Arquitectura. Ya lleva tres años.

*¿En qué universidad?*

En la Universidad Mayor.

*¿Y con quién vive en Santiago?*

No, ella vive sola. Está arrendando.

*¿Y eso todo lo financia usted?*

Sí, todo lo financio yo.

*¿Y en Ollagüe qué hacía usted, Coralina?*

En Ollagüe... tenemos un hostel nosotros. Y ahí trabajaba. Pero con el tema de la pandemia que pasó el año pasado, tuvimos que cerrar.

*Son todas mujeres las emprendedoras, ¿no?*

Sí, las que estamos trabajando, las que hacemos aseo somos todas mujeres. Sólo tenemos un hombre que es supervisor.

*¿Y cuál cree que es el sello de este grupo de mujeres líderes? ¿Cómo les gustaría ser recordadas cuando ya pasen unos años y miren hacia atrás?*

Lo que quisiera que recordáramos es que somos luchadoras, trabajadoras. Porque todas trabajamos por algo. Por nuestro sueldo, para mantener a nuestros hijos, porque la mayoría somos madres solteras.

## JORGE PÉREZ BACIGALUPO

“Operar una planta geotérmica a 4.600 metros de altura es un gran desafío”



*¿Cuál es tu función aquí en Cerro Pabellón?*

Yo soy coordinador de HSEQ (Health, Safety, Environment, Quality), en los aspectos de salud, medioambiente y calidad en temas de seguridad de las personas. En otras palabras, prevención de riesgos.

*¿Y en qué consiste tu trabajo?*

Soy parte de un equipo de prevención de riesgos que está estructurado por un coordinador y seis responsables de tareas, que tienen una función un poco más de terreno. Tenemos también una especialista en medioambiente y un control llamado ATC, que es un control documental. Nuestro trabajo consiste en hacer cumplir los protocolos y las políticas de la compañía respecto al cuidado y la seguridad de las personas. Y por supuesto, igualmente importante, el cuidado del medioambiente.

*¿Cuáles son los riesgos más graves?*

El principal, y el que caracteriza nuestro proyecto, tiene relación con los protocolos a los que obliga la exposición a una gran altura geográfica. No cualquier organismo se adapta para poder hacer un trabajo normal. Controlamos desde la base, asegurando que todas las personas que vienen acá tengan un examen previo de gran altura geográfica. Y luego por los controles propios: cómo está la saturación de oxígeno, la presión sanguínea. Después, los riesgos van a estar vinculados con la actividad productiva en que estamos. Éste es un proyecto en el que las áreas mecánicas, eléctricas y civiles convergen en la construcción y luego en la operación de una planta. Operar una planta geotérmica a 4.600 metros de altura es un gran desafío.

*¿Hay un policlínico aquí, una ambulancia para algún caso grave?*

Por supuesto, y funcionan las 24 horas. Tenemos una sala de primeros auxilios acá en el campamento. Y en Pampa Apacheta tenemos otra con apoyo permanente. Dos paramédicos y una ambulancia con comunicación directa a nuestro enfermero acá y también el equipo de apoyo. Eso en cuanto a los temas prácticos de la salud, de cómo un organismo se comporta aquí. Y luego está el aspecto de los trabajos, que son montaje, construcción y operación, donde tenemos trabajo en altura, por supuesto, y asociado a condiciones climáticas extremas. Ésta es una zona de gran oscilación térmica. De partida, con dos inviernos. Hay que estar preparados para las emergencias propias que tienen esos dos inviernos. El invierno estacional, con 25 grados bajo cero, nieve, temporales, tormentas...

*¿25 grados bajo cero?*

Sí. Y con vientos de 40 o 60 kilómetros por hora. Viento blanco. Por lo tanto, tenemos planes de emergencia activados, con los recursos necesarios, habilitación de caminos, comunicaciones. Y luego está el otro invierno, que es el invierno altiplánico, muy lindo. Es maravilloso ver la montaña en esas condiciones, pero también es muy complejo. Tenemos tormentas eléctricas de un segundo al otro. Y nos llenamos de rayos. Siempre estamos muy atentos a la prevención y activaciones de los estados de alerta, lo que incluye preparaciones con simulacros.

*En estas condiciones de gran altura, ¿cuáles son los riesgos que presentan las maquinarias?*

Un equipo tiene una especificación técnica, y tiene un rango de operación. Para hacer un movimiento, un flexible o un transportador de un fluido hidráulico tienen ciertos rangos de temperatura. Y si esa especificación no está asociada a lo que conversamos, los 25 grados bajo cero, el deterioro progresivo de esos elementos se hace mayor.

*¿Están asociados a un sistema de monitoreo sísmico? ¿Qué pasa si un volcán entra en erupción?*

Por supuesto que sí. Nosotros trabajamos en función de un plan de emergencia matricial. El tema salta a la vista, acá en el campamento estamos rodeados por tres volcanes, San Pedro, San Pablo y Panire. Y en la planta estamos muy cerca del volcán Apacheta. A diez kilómetros, vemos incluso las fumarolas. Y, por supuesto, nuestro plan de emergencia considera los monitoreos. Tenemos monitoreo a través de Sernageomin.

*En caso de ser necesaria una evacuación, ¿de cuánto tiempo dispondrían?*

Depende del tipo de emergencia que tengamos. Es posible que enfrentemos una situación de contención, en el caso de condiciones climáticas muy severas, como por ejemplo un eventual corte de caminos que nos impida asegurar las rutas de distribución. En ese caso, lo primero es asegurar los suministros vitales. Tenemos la certeza de poder operar el campamento durante cuatro, cinco o seis días sin ningún problema y, por supuesto, racionando podemos permanecer mucho más tiempo. Y si se presentara alguna actividad volcánica eruptiva, ahí el criterio y la norma es evacuar inmediatamente.

*¿Y qué pasa con la planta en el caso de evacuación total?*

Eventualmente, la planta puede funcionar de forma autónoma. Tenemos una sala de control aquí, y también tenemos una sala de control en Santiago. La planta puede operarse de forma remota.

## MIRIAM YUFLA CRUZ

“Las generaciones que vienen deberían pensar en ocupar más energías limpias”



*Tú eres una de las personas a cargo de los proyectos de energía solar aquí, en Toconce. Cuéntanos cómo es eso, cuál es exactamente tu labor.* Yo soy presidenta del comité de los paneles solares en Toconce. También soy parte de la directiva de la comunidad de Toconce: ocupo dos cargos. Esto nace a partir de un proyecto de electrificación con paneles solares, de Enel y Codelco. Ellos nos beneficiaron con noventa paneles solares.

*Nada más que para Toconce.*

Sí. Igual al principio nos costó mucho con el tema del comité, porque la gente acá no está acostumbrada al tema de los pagos, como allá en Calama. Acá se decidió una cuota de cinco mil pesos, que es sólo para el tema de la limpieza y mantención de esos paneles solares.

*Cinco mil pesos que deben pagar mensualmente los habitantes del pueblo.*

Sí, sólo para la limpieza y mantención. Porque nosotros contratamos a una persona para que se encargue de esa función.

*¿Una persona que viene de otra parte?*

No, es de la misma comunidad.

*¿Y esa persona fue capacitada por Enel?*

Correcto. Nosotros recibimos de parte de Enel las capacitaciones para la persona que actualmente está a cargo de la mantención de los paneles solares. El problema es que hay gente que no está muy acostumbrada a pagar por la luz o el agua, piensan que son energías que están en la naturaleza y que no se deberían explotar, ni nosotros pagar por ellas.

*Y antes de tener la energía solar, ¿qué energía tenían?*

Teníamos un generador diésel. Ese motor nos proporcionaba tres horas de electricidad. Pero actualmente, gracias a los paneles solares, tenemos energía todo el día. Ahora los paneles solares cubren un consumo básico, un refrigerador o una lavadora, pero no nos permiten usar máquinas más grandes, como una “galletera” por ejemplo, que consumen más electricidad.

*Pero con ese consumo básico ¿tienen asegurada luz eléctrica y electrodomésticos durante todo el día?*

Sí. A nosotros nos han hecho entrevistas muchas personas y parte de las entrevistadas han sido las artesanas de acá de Toconce, que se mostraron súper agradecidas por el tema de los paneles, porque ellas en el día trabajan sus tierras y por las noches hacen sus artesanías. Entonces la luz fue como una bendición para ellas.

*Es decir, la electrificación con paneles solares fue un buen aporte.*

Sí, muy buen aporte.

*¿Por qué te eligieron a ti como representante de la energía solar? ¿Te interesaba particularmente el tema?*

Sí, a mí me interesa mucho, por el tema del cambio climático. Creo que nosotros, la juventud, las generaciones que vienen a futuro, deberían plantearse seriamente la necesidad de ocupar energías limpias.

*¿A qué te dedicas tú, Miriam, aparte de esta función de representación?*

Yo trabajo en la minería. Soy operadora de camiones autónomos en la minera Gabriela Mistral.

*¿Tienes turnos largos?*

Siete días arriba y siete días aquí. Yo salgo de mi casa a las cinco y media de la mañana y regreso a las diez de la noche. En turnos de miércoles a miércoles. Mientras estoy trabajando, vivo en Calama y cuando estoy con descanso, me vengo para acá.

*Como encargada de la energía de los paneles solares, ¿te gustaría decir algo más?*

Solamente agradecer a Enel, porque esta energía es muy positiva en el tema del cambio climático. Y también decirles que nosotros en Toconce y Caspana hemos sido privilegiados con esta energía, pero hay muchos otros pueblos de los alrededores a los que también debería llegar.

## GÉNESIS ANSA

*“Tres mujeres en el cerro”*



*Cuéntame qué haces aquí en el campamento de Cerro Pabellón.*  
Vendo en un quiosco. Se llama Huarnikuna Urko Patapi. En quechua significa 'tres mujeres en el cerro'. Es que eran tres socias.

*¿Tú eres de origen quechua?*  
Sí.

*¿Y dónde vives?*  
Actualmente vivo en Calama. Pero estudié y viví en Ollagüe.

*¿Eres una de esas tres mujeres en el cerro?*  
No. Es que eran tres socias, y dos socias se fueron. Mi mamá quedó a cargo. Y como tenía que atender por turnos, me contrató a mí.

*Entonces, tú vienes de Calama. ¿Cómo lo haces?*  
Trabajamos turnos de quince por quince días. Cuando no estoy acá, aunque mi casa está en Calama, me voy a Ollagüe, porque mi hija estudia allá.

*¿Qué vende el quiosco, qué es lo que ofrece?*  
Todo lo que es dulce, salado, cigarros, hierbas, artículos de aseo...

*¿Cómo es el funcionamiento del quiosco? ¿Dónde se aprovisionan?*  
Cuando descanso, ahí bajamos un día antes y aprovechamos de comprar las cosas en Calama, en el comercio. Y al otro día las traemos, con mi papá. Él nos viene a dejar. Y ahí hacemos trasbordo, con otra camioneta.

*¿Y cómo es la vida cotidiana acá? ¿A qué hora te levantas?*  
El turno es de diez a diez. Me levanto como a las nueve y a las diez abro el quiosco. Después cierro a las seis y tengo dos horas para descansar, y después vuelvo a abrir a las ocho de la noche. Y cierro de nuevo a las diez.

*Esas tres mujeres en el cerro, ¿pertenecen a la misma comunidad?*  
Sí, la de Ollagüe. A todas esas pymes les dieron beneficios acá. Igual le dieron beneficios a mi tía... Ay, cómo se llama su empresa... ¡Pargua! Es de limpieza. De Ollagüe.

*Y en Ollagüe esas tres mujeres ya tenían negocios.*  
No, nadie tenía negocios. Acá empezaron.

*¿Les ha ido bien?*  
Al principio, el 2019, nos fue más o menos. No había mucha venta. Ya después el 2020 y hasta ahora, nos ha ido bien. Hay más gente. Nos fue mucho mejor.

*¿Tú podrías decir que trabajar aquí te ha cambiado la vida en algo, o no?*  
Sí, demasiado.

*¿Por qué?*

Porque yo no había trabajado nunca en mi vida. Éste fue el primer trabajo que tuve. Y, sinceramente, me compré varias cosas que yo no tenía idea que podía comprarme y ni sabía la cantidad que puede ganar una.

*¿Qué cosas te compraste?*

Me compré un auto. Un MG ZS.

*¡Vaya!*

Es que el año pasado nos fue muy bien, así que ahí juntamos y me pude comprar mi autito. Y ahora estoy construyendo una pieza.

*En Ollagüe.*

Sí. Es que mi papá tiene un hostel en Ollagüe. El hostel se llama Mamá Urku.

*¿Qué significa urku en quechua?*

Mujer.

*¿Es sacrificado para tí quedarte quince días acá?*

Sí, porque tengo un bebé. Por eso máximo quince días, le digo a mi mamá.

*¿Las hierbas que venden son de Ollagüe, o de dónde vienen?*

De Ollagüe, del cerrito de Ollagüe.

*¿Qué hierbas son?*

Uuuy... Tengo un catálogo, si después quieren mirar... Tengo rica rica, yareta, chachacoma, chuchi... chuchiandia, creo que se llama... tora-kiru. Son varias hierbas que se venden. Las hierbas las recoge mi mamá.

*¿Cómo las conoce ella?*

Desde chica las conoce mi mamá. Es que mi mami es boliviana. Por eso...

*¿Y tú hablas quechua?*

¿Yo? No (ríe)... Mi mamá es la que sabe hablar quechua.

*¿Y te gustaría aprender?*

Sí, igual. Lo más básico.



*El siguiente paso en el desarrollo de Cerro Pabellón es convertirla en una central híbrida. Enel (Chile)*



**EL FUTURO**

Era una aparente paradoja. Más de cien años después de que fueran desarrolladas las primeras tecnologías de generación geotermoeléctrica en Italia, Chile y la región andina sudamericana –una de las zonas de subducción más activas y con mayor concentración de volcanes activos en el mundo– todavía carecían de ella en su matriz energética. Pero todo cambió con la puesta en marcha de la central Cerro Pabellón: en 2017, Chile ingresa por fin al “club geotérmico”. Y posteriormente, la capacidad instalada de Cerro Pabellón se incrementa a 81 MW, con la puesta en marcha de su tercera unidad.

Ésta es la historia, incluida la más reciente. Es la historia que hemos contado en este libro. Cabe ahora preguntarse por el futuro de la energía geotérmica en Chile y el mundo, en un contexto de imperativa descarbonización de la matriz energética y de aceleradas y masivas transformaciones tecnológicas en el ámbito del almacenamiento de energía, la generación eléctrica y, en general, en el uso de energías renovables.

## Un escenario cambiante

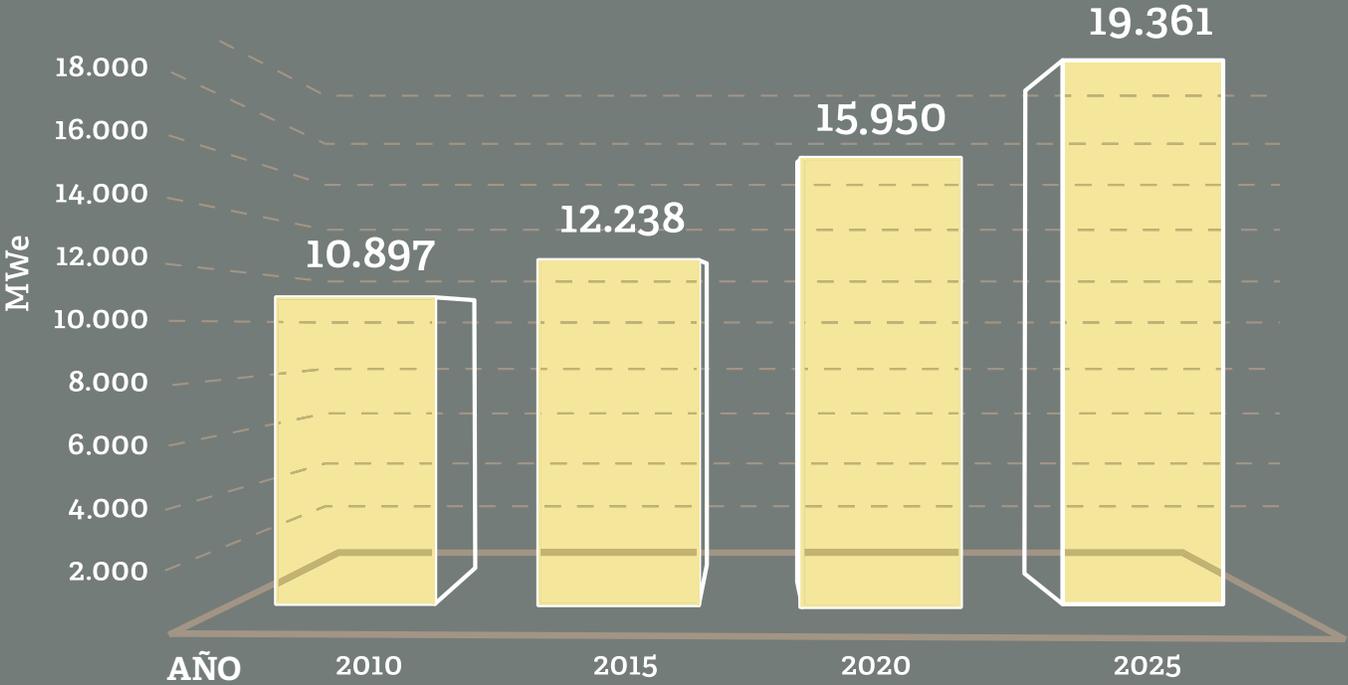
En un actualizado informe presentado al Congreso Mundial de Geotermia 2020-2021, el relator principal Gerald W. Huttner consigna que Estados Unidos sigue siendo el país con mayor capacidad geotermoeléctrica instalada en todo el mundo (en 2020 disponía de 3.700 MWe), aunque se estima que hacia 2027 podría ser superado por Indonesia (segundo productor mundial, con 2.289 MWe en 2020), gracias a un programa de desarrollo público-privado avalado por el Banco Mundial en ese país del sudeste asiático, que posee ingentes recursos geotérmicos.

Huttner agrega que en los últimos años, cinco nuevos países han comenzado a generar energía geotermoeléctrica por primera vez: se trata de Chile (81 MWe), Bélgica (0,8 MWe), Croacia (16,5 MWe), Honduras (35 MWe) y Hungría (3 MWe).

Según cifras de la Asociación Internacional de Geotermia (IGA, por sus siglas en inglés), la capacidad geotermoeléctrica instalada a nivel mundial pasó de 10.897 MWe en 2010 a 12.283 MWe en 2015. En 2020, esta cifra ya se había incrementado hasta totalizar 15.950 MWe, y para 2025 se espera alcanzar los 19.361 MWe, lo que ya constituye una caída, aunque todavía modesta, en la tasa de crecimiento.

En el mediano y largo plazo, el Consejo Mundial de Energía prevé tres escenarios diferenciados en la tasa de crecimiento de la capacidad geotermoeléctrica instalada en el mundo para el período 2015-2060: el primero, “optimista”, de 5,4%; el segundo, “básico”, de 4,6%, y el tercero, “pesimista”, de sólo 3,4%. Ninguno de estos tres escenarios alcanza ni de lejos al crecimiento de 18,5% proyectado para el quinquenio 2020-2025.

# CAPACIDAD TOTAL GEOTERMOELÉCTRICA INSTALADA EN EL MUNDO 2010-2025



## Las causas de un menor crecimiento

Diversos análisis –entre ellos el que se incluye en el ya mencionado informe al más reciente Congreso Mundial de Geotermia– coinciden en que las razones de esta caída son varias, pero entre ellas hay que destacar la competencia a precios muchísimo más bajos de la generación solar y eólica, así como del gas natural, además de la reluctancia de muchos gobiernos a invertir en *green fields* (nuevos desarrollos geotérmicos), debido al lento retorno sobre la inversión, riesgos y altos costos financieros de la actividad exploratoria. Por otra parte, y como destaca Valerio Cecchi, esta tendencia se ve acentuada por el formidable desarrollo que están teniendo las tecnologías de almacenamiento de energía, en particular la reciente introducción de las baterías de iones de litio, que en el mediano plazo permitirían mitigar sustancialmente los factores de planta más reducidos de la generación eólica y solar.

“Yo diría que hoy en día la geotermia, sobre todo en función de la competencia que tiene por parte de otras fuentes de energía renovable, sigue siendo rentable en campos que ya están explotados en alguna medida –dice Cecchi–. Siendo ya explotados, el nuevo pozo que usted hará tendrá probablemente un 70% u 80% de probabilidades de éxito, porque usted ya conoce un poco el campo. En este sentido, campos que

*Espectacular vista nocturna del parque eólico Valle de los Vientos de Enel, situado en la comuna de Calama. Enel (Chile).*





*Paneles fotovoltaicos en el campamento de Cerro Pabellón. Enel (Chile).*

llamamos *brown fields*, es decir, campos ya conocidos y explotados, pueden ser expandidos. Diría que en ese caso sigue siendo atractivo el desarrollo de la geotermia frente a otros tipos de tecnología en competencia. En particular, la energía solar y eólica, que todavía tienen la característica de ser intermitentes. Mientras la energía geotérmica puede ser ‘carbón blanco’, porque es renovable y constante un 95% del tiempo, las otras tecnologías son intermitentes. Producen cuando hay viento, cuando hay sol, cuando hay agua, y cuando no es así, hay que quemar carbón, gas o diésel, o lo que sea.”

Cecchi agrega que, no obstante, “hoy en día esas intermitencias ya se están reduciendo, porque se está introduciendo el sistema de baterías. Las baterías serán la gran novedad del futuro. Permitirán almacenar el exceso de energía que no se consume en el momento.”

### **Hibridación de centrales geotermoeléctricas: La promesa del hidrógeno verde**

Giuseppe di Marzio comparte este diagnóstico y apunta a alternativas de desarrollo para la industria geotérmica: “Claramente, el contexto de un precio más bajo de la energía y la competencia de otras energías renovables hacen de la actividad industrial geotérmica algo muy difícil, muy complejo. Es difícil pensar hoy en una futura expansión en Cerro Pabellón con una cuarta planta. Pero sí podemos seguir creciendo mediante la hibridación de la central, cosa que ya se hizo en otros países. En Estados Unidos, por ejemplo, la planta Stillwater, que empezó como una planta binaria, después se integró con una planta fotovoltaica y una tercera planta termodinámica. Combinar una tec-



*Planta híbrida geotérmica-solar de Enel en Stillwater (Nevada, Estados Unidos). Enel (USA).*

nología geotérmica con una planta fotovoltaica constituye un óptimo. ¿Por qué? Porque la pequeña baja en la generación de la planta geotermoeléctrica en las horas centrales del día se compensa exactamente con el peak de generación de una planta fotovoltaica. Combinar esos dos perfiles nos da una curva de generación aún más ‘plana’, que en términos comerciales de integración de las energías renovables en un sistema país es un óptimo que ya se puede lograr.”

Otra alternativa de desarrollo es la producción asociada del llamado “hidrógeno verde”, como se denomina al hidrógeno generado por energías renovables bajas en emisiones (aquí radica su gran diferencia con los llamados hidrógeno “azul”, extraído del gas natural, y el “negro”, obtenido a partir de carbón o petróleo). Carlos Ramírez destaca que el hidrógeno verde “se produce con energía sustentable, porque para producir el hidrógeno, en este caso, se hace una electrólisis en el agua. Se mete energía eléctrica al agua, se evapora el H<sub>2</sub>, y este H<sub>2</sub> la tecnología permite hoy transportarlo hasta en camiones. Entonces, por ejemplo, hay un gran interés en las mineras por mejorar su huella de carbono y que los camiones gigantes que operan en la minería, que gastan como 7 mil litros de diésel al día, puedan moverse con energía verde y que esa energía verde sea producida acá”.

¿Y dónde entra la geotermia en esto?

“Si tú tienes la planta de energía geotérmica allá en el fin del mundo –prosigue Ramírez–, en la cordillera y a cien kilómetros de Calama, no necesitas tender una línea de alta tensión, sino que pones la planta de hidrógeno adosada a la planta geotérmica y luego trasladas en



*Cerro Pabellón proporcionaría energía para la producción in situ de una planta de hidrógeno verde destinada a la minería. Enel (Chile).*

## CAPACIDAD Y GENERACIÓN POR PAÍSES 2015-2025

PAÍS	Capacidad MWe 2015	Energía GWh/añual 2015	Capacidad MWe 2020	Energía GWh/añual 2020	Proyección a 2025 MWe
Argentina	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00
Australia	1,10	1,50	1,62	1,70	0,31
Austria	1,40	3,80	1,25	2,20	2,20
Bélgica	0,00	0,00	0,80	2,00	0,20
Chile	0,00	0,00	48,00	400,00	81,00
China	27,00	150,00	34,89	174,60	386,00
Costa Rica	207,00	1.511,00	262,00	1.559,00	262,00
Croacia	0,00	0,00	16,50	76,00	24,00
El Salvador	204,00	1.442,00	204,00	1.442,30	284,00
Etiopía	7,30	10,00	7,30	58,00	31,30
Francia	16,00	115,00	17,00	136,00	~25
Alemania	27,00	35,00	43,00	165,00	43,00
Guatemala	52,00	237,00	52,00	237,00	95,00
Honduras	0,00	0,00	35,00	297,00	35,00
Hungría	0,00	0,00	3,00	5,30	3,00
Islandia	665,00	5.245,00	755,00	6.010,00	755,00
Indonesia	1.340,00	9.600,00	2.289,00	15.315,00	4.362,00
Italia	916,00	5.660,00	916,00	6.100,00	936,00
Japón	519,00	2.687,00	550,00	2.409,00	554,00
Kenia	594,00	2.848,00	1.193,00	9.930,80	600,00
México	1.017,00	6.071,00	1.005,80	5.375,00	1.061,00
Nicaragua	159,00	492,00	159,00	492,00	159,00
N.Zelanda	1.005,00	7.000,00	1.064,00	7.728,00	200,00
Papúa N.G	50,00	432,00	11,00	97,00	50,00
Filipinas	1.870,00	9.646,00	1.918,00	9.893,00	2.009,00
Portugal	29,00	196,00	33,00	216,00	43,00
Rusia	82,00	441,00	82,00	441,00	96,00
Taiwán	0,10	1,00	0,30	2,60	162,00
Turquía	397,00	3.127,00	1.549,00	8.168,00	2.600,00
EE.UU.	3.098,00	16.600,00	3.700,00	18.366,00	4.313,00

### Potencial corto plazo

Dominica	0,00				7,00
Montserrat	0,00				3,00
Isla Nieves	0,00				9,00
St.Lucía	0,00				30,00
S. V. y G.	0,00				10,00
Canadá	0,00				10,00
Grecia	0,00				30,00
Irán	0,00				5,00
Ecuador	0,00				50,00
<b>TOTALES</b>	<b>12.283,00</b>	<b>73.550,30</b>	<b>15.950,46</b>	<b>95.098,40</b>	<b>19.331,01</b>

camiones. Es un ahorro bastante importante, porque los yacimientos geotérmicos en Chile se encuentran en la cordillera, lejos del sistema interconectado.”

## El futuro en Chile

Durante la segunda década del siglo XXI, las inversiones en exploración, desarrollo y construcción de proyectos geotermoeléctricos ascendieron en Chile a más de US\$500 millones. La denominada Mesa de Geotermia –integrada por el Ministerio de Energía, el empresarial Consejo Geotérmico y grandes universidades, entre otros actores de la industria– cifra en 3.500 MW el potencial “explotable” de generación geotermoeléctrica de las áreas cordilleranas del país, con un 72% de dicho potencial en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, y un 28% en la zona comprendida entre la Región Metropolitana y Los Lagos. Por supuesto, el potencial geotérmico real chileno es muy superior, habiéndose catastrado en los años 80 del siglo pasado, por parte del investigador Alfredo Lahsen, cerca de 300 áreas geotérmicas asociadas con vulcanismo cuaternario, con un potencial estimado en torno a los 16.000 MW por al menos 50 años en base a fluidos geotérmicos con temperaturas superiores a 150°C y localizados a profundidades menores a 3 mil metros. Los expertos de Enel son más conservadores: Gianni Volpi establece el potencial geotérmico chileno en torno a 10.000 MW.

## Proyectos geotermoeléctricos avanzados

En la actualidad, Cerro Pabellón es la única iniciativa industrial plenamente implementada. Pero existen dos proyectos adicionales con cierto grado de avance. El primero de ellos es Mariposa, localizado en la cordillera andina de la región del Maule, 280 kilómetros al sur de Santiago y 100 kilómetros al sureste de la ciudad de Talca. Se extiende sobre el flanco nororiental del volcán Pellado, a entre 2.400 y 2.800 m.s.n.m. Aún en fase exploratoria a cargo de Energy Development Corporation (EDC), la mayor generadora de energía geotermoeléctrica de Filipinas, se estima que Mariposa posee un potencial de 160 MWe.

Otro proyecto con avances exploratorios significativos es Peumayén (ex Tolhuaca), sitio localizado 550 kilómetros al sur de Santiago y 90 kilómetros al noreste de Temuco, en el flanco noroccidental del volcán Tolhuaca y a entre 2.000 y 2.200 m.s.n.m. La concesión es manejada actualmente por la holandesa Transmark, con un potencial estimado en 70 MWe.

Pese a su gran desarrollo en términos exploratorios, ambos proyectos han registrado mínimos avances durante 2020 y 2021. ¿Cuáles son las razones que impiden o retrasan su implementación industrial? Como ya hemos visto, no se trata de impedimentos legales ni técnicos, sino de los precios vigentes en el mercado eléctrico chileno, que restan

toda competitividad a una tecnología que, como la geotermoeléctrica, requiere inversiones iniciales relativamente costosas.

“En Chile, el mercado es el mercado –sentencia Guido Cappetti–. Por lo tanto, toda la actividad se entrega al mercado. Y cuando tú dejas todo al mercado, claramente el precio del gas y el petróleo es más bajo.”

## **La geotermia como energía base**

¿Debería ir el Estado más allá de su actual función reguladora del mercado? En relación a la geotermia, muchos expertos opinan que, de un modo u otro, así debería ser. “El Estado debiese intervenir de alguna manera, pues los beneficios en cascada que genera una planta geotérmica tienen un elevado impacto social, con fuertes beneficios para las comunidades”, señala Diego Morata.

“Teniendo una mirada histórica de cómo se desarrolló la geotermia en el mundo –afirma por su parte Cecchi–, en la mayor parte de los países fue a través de la intervención del Estado. El Estado tomó el riesgo inicial, que es el riesgo exploratorio. Un riesgo que no toda empresa eléctrica está en condiciones de enfrentar.”

Un argumento de peso a favor de una mayor implicación estatal en el desarrollo geotermoeléctrico reside en el ambicioso plan de descarbonización con el que Chile se ha comprometido, el cual requiere sustituir anualmente miles de MW de generación asociada a combustibles fósiles. Y es que el cambio climático y la decreciente disponibilidad de recursos hídricos están evidenciando las vulnerabilidades de una matriz energética que a noviembre de 2019 aún dependía en un 27% de la generación hidráulica. Eso sin considerar el todavía altísimo 51,7% de participación de fuentes térmicas altamente contaminantes como carbón, gas natural y petróleo.

## **Usos directos de la geotermia**

Pero no sólo la generación eléctrica puede verse beneficiada con un mayor aprovechamiento de los abundantes recursos geotérmicos disponibles en Chile. Existen diversos procesos domésticos e industriales –climatización, calefacción, invernaderos, acuicultura, agricultura, piscinas y baños termales– que utilizan el calor geotérmico para su funcionamiento. A diferencia del manejo indirecto del recurso de alta temperatura en la generación eléctrica, se trata de la utilización directa de recursos geotérmicos de baja temperatura o baja entalpía (bajo los 150°C). Y su relativa ubicuidad abre enormes posibilidades a futuro.

De hecho, potencias geotermoeléctricas mundiales como Islandia iniciaron su relación con la geotermia mediante tecnologías de uso directo y no con la generación geotérmica de electricidad, ya que ésta fue anticipada por grandes proyectos de calefacción distrital que

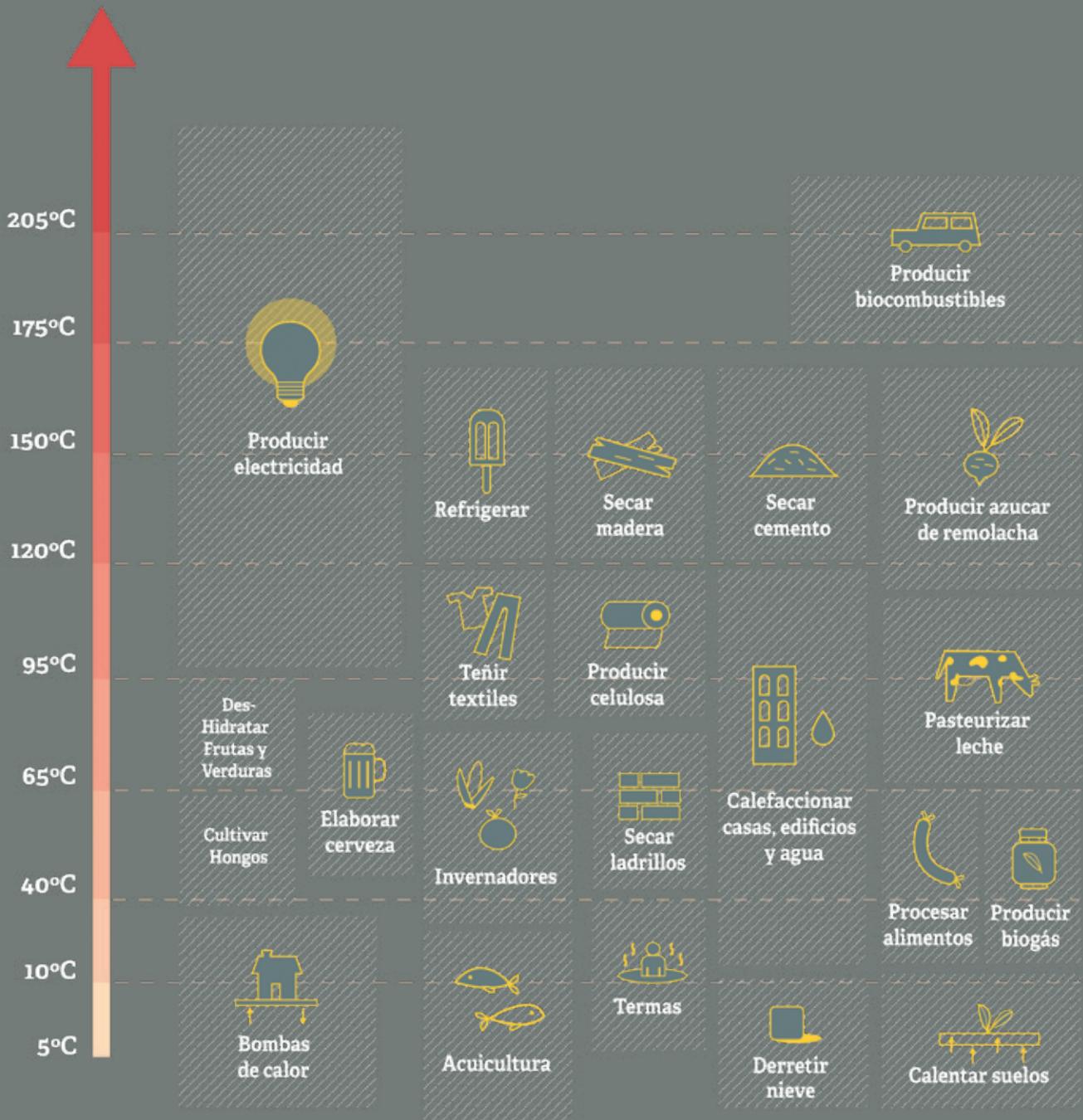
# PLANTAS GEOTERMOELÉCTRICAS EN EL MUNDO



Fuente: ThinkGeoEnergy

# USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA A DIFERENTES TEMPERATURAS

La geotermia puede aprovecharse para generar electricidad y para climatizar casas (calor y frío), edificios, barrios completos, y usar esta energía para casi cualquier proceso productivo que necesite de calor.





*La energía geotérmica ya está haciendo una importante contribución a la descarbonización de la matriz energética chilena. Enel (Chile).*

hasta el día de hoy utilizan directamente el calor geotérmico, distribuyendo fluidos de baja entalpía mediante tuberías a áreas urbanas o semiurbanas circunscritas.

“Los usos directos tienen claramente un mercado enorme en Chile –dice Guido Cappetti con la calefacción distrital en mente–. Porque, por ejemplo, en el sur tienes bastantes recursos y hace bastante frío, por lo que es conveniente. La geotermia puede sustituir la leña, eliminando un grave problema ambiental de manera fundamental. Se trata de proyectos a desarrollar a nivel local, sobre todo, proyectos chicos, con una fuerte participación municipal o del Estado a nivel regional.”

## **Bombas de calor de fuente terrestre**

Tradicionalmente, los usos directos de la geotermia en Chile se limitaron al ámbito de los recursos hidrotermales naturales, con fines sanitarios, turísticos o de recreación. El escenario comenzó a cambiar con la llegada a Chile en 1996 de las primeras bombas de calor geotérmicas (o bombas de calor de fuente terrestre, como prefieren llamarlas los ingenieros para evitar toda confusión con la tecnología geotermoeléctrica). Es un tipo de bomba de calor que calefacta o enfría un espacio interior mediante el intercambio de calor con el suelo, recurriendo usualmente a un ciclo de refrigeración por compresión de vapor. Las bombas de calor terrestre recolectan sin ningún tipo de intermitencias el calor absorbido por la tierra a partir de la radiación solar (la temperatura bajo los 6 metros de profundidad es relativamente equivalente a la temperatura media anual del aire en

la localidad de que se trate). Estas bombas son más eficientes desde el punto de vista energético, porque las temperaturas subterráneas son más estables que las temperaturas del aire durante todo el año.

Según el CEGA, a la fecha se han instalado en el país al menos 8 MWt de capacidad en bombas de calor de fuente terrestre. Y probablemente la cifra sea mayor, dada la dificultad de recabar información pública al respecto. La nueva tecnología ya ha sido utilizada en grandes proyectos: es el caso de la climatización de dos grandes hospitales públicos en las ciudades de Rancagua y Talca. Asimismo, las bombas de calor de fuente terrestre se están usando para calefaccionar diversos establecimientos educacionales en la zona sur de Chile (Puerto Montt, Villarrica y Coyhaique, entre otras localidades beneficiadas). En el ámbito industrial, la tecnología se ha introducido con éxito en la acuicultura, invernaderos y las empresas vitivinícolas.

## La democracia del calor

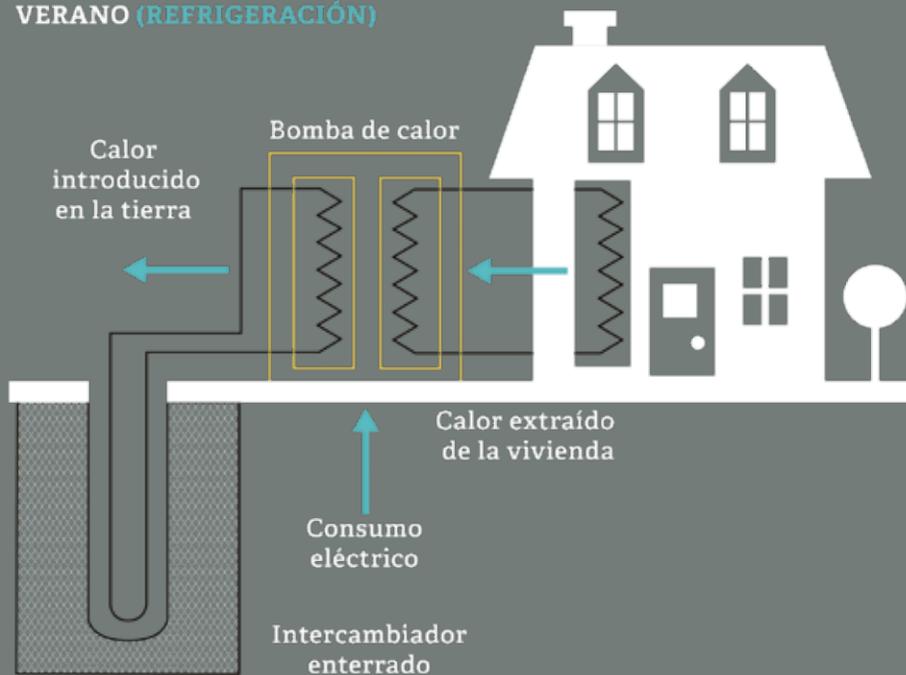
“Tú puedes aplicar el uso directo en cualquier parte del territorio – dice entusiasmado Diego Morata–. Es la forma más democrática de generar calor, porque no necesitas ni siquiera tener volcanes, en cualquier lado la puedes aplicar. Y ahí es cuando te planteas: ¿Y por qué no se desarrolla más? ¿Por qué no hay más proyectos?”

Parte importante de la respuesta a estas preguntas reside en las imperfecciones de la legislación específica existente en Chile. En este sentido, ya está propuesta a trámite legislativo una iniciativa que “perfecciona la ley N°19.657 sobre concesiones de energía geotérmica para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento somero de energía geotérmica”. La iniciativa busca promover los usos directos de la geotermia mediante la eliminación de importantes barreras administrativas. Se pretende superar así una situación disfuncional en la que los proyectos de usos directos, comparativamente pequeños, han estado sujetos al mismo régimen concesional que los grandes proyectos industriales geotermoeléctricos.

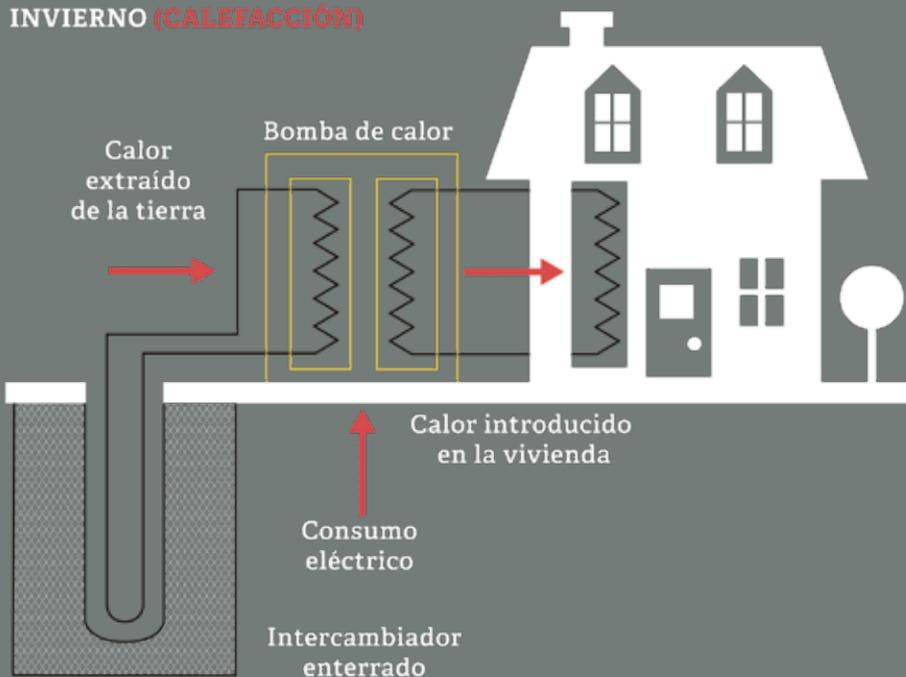
Se irá avanzando así en el cumplimiento en Chile de esa vieja promesa del calor de la tierra, la misma que hace cien años se mostró a la mirada entusiasta del ingeniero Ettore Tocchi en las alturas del campo geotérmico del Tatio.

# ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS DE CALOR DE FUENTE TERRESTRE

## VERANO (REFRIGERACIÓN)



## INVIERNO (CALEFACCIÓN)





*Cerro Pabellón genera energía renovable las 24 horas del día y los 365 días del año.  
Enel (Chile)*



## LUCA ROSSINI

Jefe de operaciones y mantenimiento geotérmico (Italia) en EGP :

“Cerro Pabellón tiene todas las lecciones aprendidas en 200 años de geotermia”

Con 62 años cumplidos, Luca Rossini tiene tras de sí toda una vida consagrada al desarrollo de la energía geotérmica y las energías renovables. Responsable de la construcción de plantas geotérmicas, eólicas, solares e hidroeléctricas en 18 países y 4 continentes por un total de 17 gigavatios de capacidad instalada, su contribución personal y corporativa al desarrollo global de las energías renovables ha sido decisiva.

“Después de 100 años, ahora tenemos en Italia 916 MV de potencia instalada. Y en todo el mundo, Enel Green Power es la primera que tiene plantas geotérmicas fuera de su país. En Norteamérica 160 MV, y 81 MV en Chile”, dice con cierto orgullo.

Y como el gran apasionado de su trabajo que es, no quiere detenerse. Confiesa con humor que ya está en “la tercera juventud”, pero dice que “tengo que llegar por lo menos a los 95 años. Por eso no quiero jubilarme.”

Nacido en 1960 en Pisa, la cuna intelectual y científica del desarrollo global de la tecnología geotermoeléctrica, Rossini se graduó en Ingeniería Mecánica por la prestigiosa universidad de su ciudad natal. En 1989 llegó al área de ingeniería de plantas geotérmicas de Enel, donde con el tiempo destacó su trabajo, siendo designado gerente de proyectos de nuevas plantas en Pisa, Siena y Grossetto. Más tarde ocupó durante tres años el cargo de gerente de Operaciones en Larderello. “Allí donde todo comenzó”, observa.

En 2006 se traslada “con toda la familia” por primera vez al extranjero, a Costa Rica, en calidad de director de construcción de plantas de energías renovables para América Latina. Ya en 2002, Enel Green Power (EGP) había adquirido “dos sociedades, una en Norteamérica y otra en Costa Rica, con sede en San José, que desarrollaban energías renovables.” Según Rossini, el objetivo era “desarrollar plantas renovables en Norteamérica y Centroamérica también. EGP ya tenía proyectos en desarrollo, pero no tenía la geotermia.”

### Un nuevo portafolio

En efecto, fue Luca Rossini quien por vez primera incluyó la energía geotérmica en el portafolio internacional de EGP, pese a una conflictiva y frustrada incursión en la producción geotermoeléctrica en El Salvador. “Teníamos varias concesiones en Guatemala, Nicaragua y Chile -recuerda Rossini-, porque la empresa costarricense tenía también concesiones en Chile, las primeras hidroeléctricas en Lati-

noamérica, Pilmaiquén y Pullinque. Ésas eran las plantas que tenía en Chile, y otra en Guatemala y una más pequeña en Costa Rica. Nosotros desarrollamos el tema eólico con EGP en Costa Rica, y empezamos a buscar la geotermia en Nicaragua, Guatemala y Chile. Fueron los únicos países que permitieron el desarrollo del libre mercado mediante leyes... Hicimos pozos en los tres países. Pero encontramos recursos solamente en Chile, en El Tatio y en Cerro Pabellón.”

Como encargado de dirigir la construcción de plantas de energía renovable en toda la región, a Luca Rossini le correspondió llevar adelante, contra viento y marea y pese a innumerables vicisitudes, el desarrollo del proyecto de Cerro Pabellón. Un proyecto complejo y desafiante, la única planta geotermoeléctrica industrial erigida en medio de la nada a 4.500 metros sobre el nivel del mar.

El cielo es una de las cosas que recuerda Luca Rossini de Cerro Pabellón: “El cielo que se ve a 4.500 metros es de un azul que no se ve en ningún otro lugar. La noche y el día. Es una cosa única.”

## Lecciones aprendidas

¿Qué lecciones dejó la experiencia de construcción de esta verdadera joya de la Corona geotérmica? “La más importante es que se cambió la base de los criterios de desarrollo de la investigación superficial – reflexiona Rossini-. Con la exploración superficial se ve dónde hay agua caliente, fumarolas, en fin, las manifestaciones que los geólogos especializados piensan que son indispensables. Sin esto, no existe nada. Cerro Pabellón se encontró porque Codelco, que era nuestro partner, junto a Enap, hizo pozos con objeto de encontrar agua para una mina de cobre, y encontraron agua caliente. Donde hay manifestaciones naturales, es sencillo. Pero Cerro Pabellón no tiene ninguna manifestación natural. Era más complejo.”

“La otra gran lección aprendida fue trabajar a 4.500 metros”, dice Rossini. Con los criterios establecidos por largos años de práctica industrial, el proyecto era sencillamente “una locura”. Y una prueba de ello fue que falló la estimación de costos. “Nos equivocamos cuatro veces. Las estimaciones de costos las habían hecho las mejores personas en Pisa, los mejores expertos de Enel (...) Aquí en Pisa tú puedes saber cuánto cuesta una planta Ormat en Toscana, en Larderello, en toda Italia, en toda Europa también. Pero en Chile, a 4.500 metros (...) Ésa es la segunda gran lección. Nos tardamos mucho tiempo en desarrollar Cerro Pabellón (...) La planta tiene todas las lecciones aprendidas en 200 años de geotermia. Ésa es la ventaja que aportamos nosotros. Aportamos 100 años de cultivo geotérmico. Porque lo más importante es lo que pasa bajo la tierra, no es la planta sobre la superficie. Y alguien que construya la planta lo encontramos casi en cualquier lugar. Pero encontrar alguien capaz de decirte cuánto es el máximo de recursos que tú puedes extraer, y cuánto y dónde reinyectar, para garantizar que de verdad sea una energía renovable, no es tan sencillo. Aquí en Italia tenemos 500 pozos

que nos permiten este expertise (...) En la geotermia el recurso es el calor bajo la tierra. El vapor es un vehículo mediante el cual nosotros extraemos el calor, la energía bajo la tierra de la que todos los expertos geotérmicos dicen que hemos extraído el 5% mundial, con todas las plantas que están en operación. Alrededor de 17 mil megavatios. ¿Por qué el 5%? Porque falta el agua para hacer el círculo (...) Esto se llama desarrollo sostenible (...) Esto es lo que llevamos desde Italia a Cerro Pabellón.”

“El desafío ha sido altísimo... La relación con los pueblos originarios, trabajar a 4.500 metros, y un equipo que no existía, porque cuando yo llegué en 2006 sólo había tres personas, con un plan de contratación de por lo menos 50 ó 60 personas. (...) La sinergia Enap-Enel ha sido fundamental. Claramente, el respaldo político. Eso ha sido algo muy importante (...) Siempre creí que era posible lograrlo. Ésa es la llave mágica.”

## El futuro

Tras el desafío vivido en Cerro Pabellón y ya de regreso en Italia, Luca Rossini fue designado jefe global de Construcción en EGP, después jefe de Gestión de Proyectos Globales de EGP, y en 2019 ocupó el cargo de jefe del área de Ejecución para Norteamérica, Centroamérica, África, Asia y Oceanía en la misma empresa. Por último, en enero de 2021 llegó a su cargo actual como jefe de Operaciones y Mantenimiento Geotérmico para Italia. Se trata de una vasta trayectoria que ya le permite reflexionar con propiedad sobre el futuro de la tecnología geotérmica.

Y sobre el particular, Rossini es optimista. Por una parte, apunta a la sinergia con otras tecnologías. “Nosotros tenemos una planta en Italia que se asocia con la biomasa para calentar vapor geotérmico. Incrementamos el desempeño de la planta en casi un 10%, algunas veces el 15%. Es un ejemplo híbrido. Otro ejemplo híbrido es la central en Cove Fort (Estados Unidos), que empezó con una planta geotérmica de la que salieron recursos que no eran muy sobresalientes, y agregamos primero una planta termosolar de concentración con espejos, y luego otra planta fotovoltaica para mejorar la eficiencia de todo el sistema. Ésos son dos ejemplos de sinergia, únicos en el mundo, que demuestran el carácter pionero de Enel.”

Más allá de desarrollos en curso en calefacción distrital en Alemania e Italia y nuevas plantas químicas para la extracción del litio en las salmueras geotérmicas, Rossini cree firmemente que la geotermia no está acabada, “porque como ya dije, lo que se explota es el 5% del calor. Tenemos que mejorar la manera de extraer el agua para obtener ese calor, que en un montón de lugares no está. Y cuando en 1980 en Italia se pensaba que la geotermia estaba acabada, teníamos me parece 400 megavatios, 50% de lo actual, y se hacían pozos solamente a dos mil metros. Se pensaba que dos mil metros era la

profundidad máxima. Entonces alguien pensó que se podían hacer pozos más profundos y empezamos a hacerlos. Ahora la profundidad máxima alcanza los 4.500 metros. Y también en la reinyección... En 1970, con el mismo vapor se produjo 30% más de energía. La respuesta es no, la geotermia no ha dicho su última palabra, yo creo que hay un montón de desarrollos (...) En Italia tendremos 200 megavatios en los próximos tres años, es más del 35% de incremento en la potencia instalada que tenemos.”

*Planta geotérmica de Cerro Pabellón  
Enel Chile*



*Pozo de producción y vaporducto.  
Planta geotérmica de Cerro Pabellón.  
Marcela Mella.*



## JAMES LEE STANCAMPIANO

### CEO de Enel Generación Chile

#### “Cerro Pabellón lo soñamos todos”

Graduado en Economía Ambiental por la Universidad de Siena, James Lee Stancampiano llegó a Chile en 2012 para hacerse cargo del área de Desarrollo de Negocios del Cono Sur en Enel Green Power. “Había venido por dos años, y sigo envejeciendo acá, porque me enamoré de todo lo que podemos hacer en este país”, reconoce entusiasmado.

En su rol clave de “pitcher” al interior de Enel de grandes proyectos energéticos en la región, un hito particularmente complejo para él fue lograr la aprobación de la primera planta industrial geotérmica de América del Sur. Y es que con las grandes inversiones iniciales y el alto riesgo financiero que implica todo nuevo proyecto geotérmico, por una parte, y con los precios de generación en una tendencia sostenida a la baja por la irrupción de nuevas tecnologías renovables, “los números no daban. El proyecto estuvo muy cerca de no existir. De no nacer... Y eso hubiese sido una decepción total. Porque ya habían sido perforados los pozos. Habían siete u ocho años de trabajo. Familias, personas que habían venido desde otros países. Y había un socio, porque Enap también soñó con nosotros. Nos apoyó muchísimo.”

#### Un proyecto único

“Nosotros no somos una ONG. Si los números no te dan, y los técnicos presentan una matriz de riesgo que no puede ser aprobada, no hay nada que hacer. Entonces, abandonamos el proyecto geotérmico por un tiempo, y dijimos: ‘esto lo tenemos que optimizar’. Fue a aprobación como cuatro veces. Y siempre se rechazaba. A mí no me gusta rendirme: pasamos tiempo dándole vueltas a estos modelos financieros, empujándolos un poquito con el cariño que uno le tiene a su bebé, para forzar un poco el sueño, ¿no? Pusimos mucho profesionalismo, buscando soluciones de innovación, de *energy management*. Hicimos, la verdad, lo que no se ha hecho nunca en otro proyecto. Porque repito, es un proyecto único. Y seguirá siéndolo”.

“Quien ha visitado la planta no puede no enamorarse. La planta te deja algo. Yo he visitado muchas plantas en el mundo, pero ésta es especial. Se enojan un poco los colegas solares y eólicos, me dicen: ‘tú siempre con la geotermia’... Hay muchos colegas que trabajaron a lo largo de los años para llegar a Cerro Pabellón. Obviamente nuestro soñador número uno, un gran profesor, es Guido Cappetti, que nos enseñó a todos muchísimas cosas que no sabíamos. También estuvieron Martino Pasti, Gianni Volpi, Germain Rivera, Carlos Ramírez, que soñaron el fluido geotérmico... Es tanta gente que se puede hacer un listado infinito...”

“Y no hay que olvidar a Francesco Staracce. Porque si Francesco, que es nuestro consejero delegado, no hubiese soñado con nosotros... Muchas

veces, cuando te tienen que dar la plata, no te dejan soñar mucho. Él nos permitió soñar. En realidad, él fue el primero en hacerlo. También tuvimos una gran participación técnica de nuestro socio israelí, Ormat. Ellos también son parte de la historia. Tanta gente... Giuseppe di Marzio, que fue el jefe de esta planta por muchos años. Y Simone Vilani, que tiene una función relevante que es, básicamente, dar la bendición final, porque él es el que conecta los cables, viene de Italia a energizar... Tanta gente. Algunos ya se fueron, o tienen otros destinos, pero son parte de nosotros y tenemos que recordarlos.”

## Hibridación

Aunque el desarrollo de nuevos proyectos geotérmicos en Chile no parece viable en las actuales condiciones de mercado, el Departamento de Innovación de Enel sí está considerando diversas y atractivas alternativas que ofrece la hibridación de la planta de Cerro Pabellón. “La primera es el hidrógeno verde –apunta Lee Stancampiano–, contando con la gran ventaja que tiene la geotermia: a diferencia de nuevas tecnologías renovables, tiene una banda de 24/7. No es intermitente. Asociar un electrolizador a la planta geotérmica para la producción de hidrógeno en algún momento del día parece ser una solución súper competitiva y obviamente interesante. Una parte de la generación que tú inyectarías a la red no la inyectas, y te vas directamente al electrolizador, donde se separa hidrógeno y oxígeno en estanques. Estamos estudiando colaboraciones en el norte en relación a la utilización de hidrógeno. Es un combustible, véanlo como un combustible. Limpio sólo si se utiliza energía renovable para producirlo. Si no, es sucio como otros combustibles.

“Segunda cosa, siempre hablando de hibridación. Ya hemos desarrollado, porque sólo resta aprobarla desde el punto de vista medioambiental, una planta solar fotovoltaica asociada a la generación geotérmica, ya que la planta geotérmica dejó un espacio libre de evacuación a la red. Es una línea de 100 megas, y en realidad llegamos a 81. Justo cuando hay sol en el día, hay menos eficiencia. Esto está asociado al calor durante el día. Vamos a inyectar en la misma subestación con paneles fotovoltaicos solares”.

“Y tercero: nuestro Departamento de Innovación, junto a otros actores internacionales, ha empezado a estudiar un proceso que básicamente consiste en extraer minerales de los fluidos geotérmicos. Y tiene una ventaja, porque en realidad, algunos minerales que para nosotros no son tan amigos, ya que implican una deficiencia en la performance de la planta, sí que tienen valor económico, como el silicio y el litio. Y hay varias empresas a nivel mundial que ya golpearon la puerta, porque saben que estamos asentados en un lugar donde los minerales bajo la tierra tienen mucho valor. Allí en Apacheta, en el norte de Chile, están las principales empresas mineras del mundo. Y de allí que transformar un costo que limita la generación es un valor para Chile y para el propio Enel. Esto es disruptivo, porque nunca se había visto algo así.”

Recordando los cien años de la exploración geotérmica en Chile, Lee Stancampiano dice que “nosotros hoy en día con Cerro Pabellón tenemos contratos con las mineras. La planta geotermoeléctrica ya está brindando energía renovable a la minería. Entonces, ya se cumplió el sueño, la visión de Ettore Tocchi.”

## Descarbonización y electrificación de consumos

A partir del objetivo de Enel de lograr *net zero* (cero emisiones) hacia 2040, James Lee Stancampiano señala que “hay varias dimensiones en las cuales estamos actuando de forma muy convencida. Y sin vuelta atrás. La primera misión es descarbonizar absolutamente nuestra matriz de generación, con un gran plan de inversiones en las renovables. Ya hemos presentado el nuevo plan, son 3.300 megawatts. Estamos hablando de 2.500 millones de dólares en inversión, más o menos. El proyecto de renovables está conformado principalmente por solares y eólicas”.

“En segundo lugar está la electrificación de los consumos. Hay muchísimos consumos, incluidos los de cada uno de nosotros en su casa, que pueden ser electrificados. Y deben ser electrificados, porque al final serán más eficientes y más sostenibles para el país. También el transporte. Nosotros fuimos los primeros que apostamos junto con el ministerio a traer los primeros buses eléctricos. Muchos decían que estábamos locos”.

## AGRADECIMIENTOS

Durante el siglo que ha transcurrido desde que el ingeniero Ettore Tocchi viniera desde Larderello para dar inicio a la exploración geotérmica en el altiplano chileno, las vicisitudes históricas, científicas y técnicas del desarrollo de la geotermia en Chile han sido múltiples. Este libro pretende ofrecer un recuento de lo que podríamos llamar la historia –o la aventura– de la geotermia en Chile de la manera más clara y sucinta posible, porque no está destinado únicamente a los especialistas, sino también a los estudiantes (y no sólo los de geología) y, en general, a todos quienes se interesan por el desarrollo de las ciencias y sus aplicaciones técnicas.

La historia de la geotermia en Chile va de comienzos del siglo XX a comienzos del XXI o, dicho de otro modo, de las primeras exploraciones de Ettore Tocchi en El Tatio a la primera planta de América del Sur, Cerro Pabellón, que inyecta energía renovable al Sistema Eléctrico Nacional. Este libro está dedicado, por lo tanto, a todos aquellos que hicieron posible este proceso.

Y, en particular, no podemos dejar de manifestar nuestro más sincero agradecimiento a los profesionales, sin cuya colaboración, altamente competente y siempre amistosa, este libro no habría podido ser escrito.

Les hemos pedido que se presenten por sí mismos.

## GUIDO CAPPETTI

Italiano. Ingeniero Químico de la Universidad de Pisa.

Me desempeñé hasta el primer semestre del 2021 como gerente general de Geotérmica del Norte S.A. (GDN), sociedad conformada por Enel Green Power Chile y la estatal Enap, con el objetivo de explorar y desarrollar los recursos geotérmicos en Chile. Bajo mi dirección la compañía llevó a cabo el proyecto de Cerro Pabellón, la primera central geotérmica del país y de Sudamérica inaugurada en 2017.

Desde mi llegada a Enel en 1976, he participado en el desarrollo de numerosos proyectos geotérmicos en diferentes países, incluyendo Italia, Grecia, Estados Unidos, Indonesia, Bolivia, China y Centroamérica. Entre 2001 y 2004 presidí la Asociación Internacional de Geotermia y he publicado más de 40 estudios científicos.

## GIANNI VOLPI

53 años, italiano, en Enel Green Power Chile soy “Responsable de Actividades del Subsuelo” para la tecnología geotérmica.

Graduado en Geología en la Universidad de Pisa, Italia, en 1993, PhD en Geofísica en la Universidad de Pisa, en 1996. Estoy relacionado con la geotermia desde el año 1998, cuando fui contratado por Enel Green Power Italia.

De entonces he estado viajando en tres países distintos con Enel Green Power (El Salvador, Nicaragua y Chile) siempre como residente, haciéndome espacio y carrera hasta alcanzar la posición actual.

La geotermia para mi es mi trabajo, mi “vida laboral adulta” y un gran desafío tecnológico que me ha llevado a viajar por el mundo. Ser parte de proyectos de generación de plantas de energía renovable es un orgullo y una gran satisfacción. Aun si ya tengo mi edad... no tengo en absoluto la intención de cambiarme de rubro. La geotermia en Chile tiene un gran potencial y ¡quiero ser parte de su futuro!

## GERMAIN CHRISTIAN RIVERA ROMERO

Chileno, Geólogo de la Universidad de Chile, Diplomado en Geomática Aplicada y Magister (c) en Ciencias - Mención Geología. Profesional con 15 años de experiencia en exploración y explotación geotérmica, ligado a Enel Green Power Chile, donde actualmente me desempeño como Geólogo Senior del Centro de Excelencia Geotérmico.

Mis primeros acercamientos a la geotermia los tuve en el curso de Volcanología, dictado por los profesores de la Universidad de Chile Alfredo Lahsen y Carlos Ramírez el año 2000, y luego como estudiante en práctica y en

mi memoria de título, para finalmente llegar a trabajar para ENG y GDN (Sociedades Enap – Enel Green Power) en el año 2006 y luego directamente para Enel Green Power, lo que además me ha llevado a viajar a Italia y Perú.

En mi vida profesional he optado por trabajar en la geotermia, que me ha dado la posibilidad de hacer un aporte social al participar del desarrollo de una energía limpia y sustentable, de lo cual me siento orgulloso. Además, hemos hecho historia, partiendo desde de la exploración de este recurso energético y logrando llevar a su materialización a Cerro Pabellón, la primera planta geotérmica de Sudamérica.

**CARLOS FELIPE  
RAMÍREZ RAMÍREZ**

Chileno, geólogo de la Universidad de Chile (1975), MPhil Open University en Volcanología. Profesional con 11 años de experiencia en exploración geotérmica.

Al principio de mi carrera (70s-80s) estuve trabajando en volcanología en los Andes del norte de Chile, donde conocí algunos lugares aptos para la extracción de energía geotérmica, lo que fue mi primer acercamiento con esta disciplina.

Quise contribuir a desarrollar la exploración de energía geotérmica en Chile. Tuve oportunidad de conocer plantas geotérmicas en Estados Unidos, México e Italia, lo que me ayudó mucho a entender esta forma de explotar un recurso de las profundidades de la tierra. Participé en las labores de exploración de las sociedades Enel Green Power y Enap (ENG y GDN), cubriendo gran parte del país, y prospectos en el sur de Perú, continuando en la misma labor hasta la inauguración de la Planta Geotermoeléctrica Cerro Pabellón (2017).

Tuve gran satisfacción de participar en la búsqueda de lugares que pudieran ser de interés para este tipo de energía, dadas las características de sustentabilidad de este recurso.

*Agradecemos a quienes han sido parte de esta historia,  
en la fotografía parte del equipo en la inauguración de Cerro Pabellón,  
Enel (Chile).*





*Operarios, altos ejecutivos y autoridades gubernamentales posan para una foto panorámica el día de la inauguración oficial de la central geotermoelectrica. Enel (Chile).*



**LARDERELLO**

**SPA**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**ING. E. TOCCHI**

**EL TATIO**

## EL TATIO

Si bien el objetivo directo de mi reciente viaje a Chile fue el estudio de las manifestaciones de vapor señaladas en la región del Tatio, y este informe debiera esencialmente referirse a tal estudio, estimo oportuno y útil anteponer una rápida mirada sobre las condiciones generales de todo el “departamento” de Antofagasta. En cuya extremidad oriental, en el confín con Bolivia, se encuentran tales manifestaciones que utilizadas, eventualmente, para la producción de energía eléctrica, de manera similar a lo que brillantemente se ha hecho en Larderello, podrían en este departamento (rico, como veremos, de aún poco valorados recursos naturales), convertirse en uno de los más preciosos coeficientes de progreso.

El departamento se extiende desde los 18 a los 27 grados de latitud sur -entre la costa del Pacífico y la cordillera de los Andes- en una casi siempre desolada región del norte de Chile, que comprende al Desierto de Atacama entre el departamento de Tarapacá, cuna de la industria de salitre en el norte y aquel de Taltal, al sur. Y, precisamente, entre el paralelo 21 y 24 desde Los Andes hasta el océano, se extiende en una superficie de cerca de 120.000 kilómetros cuadrados, el “departamento” de Antofagasta.

Tiene una población que oficialmente asciende a los 250.000 habitantes (poco más de dos habitantes por kilómetro cuadrado). Gran parte de este territorio, que fue boliviano, pasó con las provincias peruanas de Tacna y Tarapacá, a mano de los chilenos luego de la victoriosa guerra por ellos sostenida en 1879 contra Perú y Bolivia aliados. En los cuarenta años transcurridos desde aquella guerra, el progreso de estas tierras ha sido notable: la ciudad de Antofagasta, poco más de un villorrio de 7.000 habitantes en 1879, no tardó en crecer a la importancia de capital de uno de los más ricos distritos de la República. El descubrimiento de salitre en su territorio tuvo una gran y decisiva influencia en su rápido desarrollo. A pesar de las más desfavorables condiciones, comenzando por la absoluta falta de agua, que por años se debió importar desde puertos lejanos y que hoy día es traída desde los confines de Bolivia con un acueducto de 450 kilómetros de largo, su población se ha decuplicado. La ciudad cuenta hoy con 70.000

habitantes, y como ya se ha dicho, todo el departamento, con 250 000. Mientras que, en los tiempos no lejanos de la dominación boliviana, la ciudad tenía 7.000 y la provincia apenas 30.000 habitantes.

Antofagasta ocupa hoy el cuarto lugar entre las ciudades chilenas por población. Y su puerto en construcción ya está a punto de superar al de Valparaíso el cual, por tanta favorable circunstancia, conserva todavía el primer lugar. No hay duda de que el puerto de Antofagasta dentro de algunos años no va solamente a superar al de Valparaíso, sino que se convertirá en el más importante de América meridional en la costa del Pacífico. Basta reflexionar, en efecto, sobre su posición privilegiada: emplazado en una región rica en minerales, ofrece una salida natural al océano Pacífico a Bolivia y a las provincias de la República Argentina, que son escasamente valorizadas por la enorme distancia que las separa del Atlántico.

El ferrocarril Antofagasta-Bolivia, construido por la misma sociedad inglesa que ha dotado de agua potable a la ciudad y a las oficinas de la Pampa salitrera, es un factor importantísimo en este devenir. Los argentinos ahora avanzan con su vía férrea desde la provincia de Catamarca hacia el confín de la frontera chilena, en correspondencia con la Puna de Atacama (que es quizás uno de los más interesantes y ricos territorios de la provincia Antofagasta), y los chilenos discuten hoy día sobre la opción más conveniente de trazado para enlazar su puerto a través de la Pampa y la Puna con las líneas argentinas. Se tendría así un nuevo paso de los Andes que tendría una ventaja sobre el ya existente por su posición geográfica, la de no estar jamás interrumpido por las nieves.

Intereses estatales -chilenos y argentinos- e intereses de privados, trabajan para apurar la ejecución de esta vía férrea relativamente breve (menos de 500 kilómetros de Antofagasta hasta la frontera) y sin dificultades a superar, considerando la naturaleza del terreno de grandes extensiones planas y carencias de importantes cursos de agua que franquear.

La Puna de Atacama -que esta línea forzosamente debe atravesar-, y que hoy podemos decir fuera de

cualquier vía de comunicación cómoda, es riquísima y se conocen apenas sus riquezas minerales. La sal gema excepcionalmente pura y abundante, que cubre en el fondo de un antiguo mar seco: el Salar de Atacama. A ella se agregan el bórax, el carbonato de sodio, el yeso, el azufre, el cobre en estado nativo, la plata y quizás el petróleo y los esquistos bituminosos. Sin ningún régimen de aguas, por lo demás escasísimas en superficie, el suelo se volvió estéril en vastas extensiones. Sin embargo, puede ser muy fecundo apenas regado, como lo demuestran sin excepción las pocas localidades donde afortunadas circunstancias geológicas permiten a las aguas -que deben correr abundantes en profundidad- aflorar. También existen oasis de riquísimas praderas con frutas de todo tipo que gozan de un clima delicioso, debido a la compensación de los efectos opuestos de la baja latitud (23 y 24 grados) y la notable altura regularmente superior a los 2000 metros.

Una fuerza motriz eficaz y puesta a disposición de la agricultura y del minero, asegurando con una vía férrea la fácil comunicación al mar, operaría una maravillosa transformación en las condiciones de este rico territorio todavía por valorizar. Pero desgraciadamente, es justamente la fuerza motriz, que con la escasez del agua serán siempre difícil de suplir, a menos que se logre utilizar convenientemente otras energías, entre ellas la geotermia.

No solamente en la Puna de Atacama es posible un notable desarrollo, sino en el distrito entero, el cual está todavía lejos de ser completamente explorado desde el punto de vista minero e industrial. La falta de agua es la razón por la cual vastas extensiones del territorio desértico no han sido jamás atravesadas ni por los mismos -y muy resistentes- indígenas. No obstante, este podría encerrar yacimientos que la moderna técnica del transporte y del aprovisionamiento podrían permitir su explotación y provecho.

La vía férrea a Bolivia y el acueducto, su indispensable correlato, ya dieron una primera luminosa prueba. Otras vías férreas y otros acueductos han llevado el trabajo al corazón de las regiones perdidas de la Pampa salitrera, doquiera que los audaces exploradores descubrían -sufriendo a menudo los tormentos del hambre y la sed- el precioso "caliche" con alto contenido de nitrato.

La Pampa salitrera del interior de Antofagasta, venía así a competir con la de Tarapacá -más antiguamente explotada- y sus cerca de tres millones de toneladas anuales que representan toda la producción chilena.

Pero las investigaciones y posibles explotaciones no se limitan al salitre. El vasto salar de Ascotán, localizado sobre la línea ferroviaria a Bolivia, ha producido en los últimos cinco años más de 100.000 toneladas de bórax, y el bórax que existe en otros salares dejados como reserva no es explotado por la falta de medios de transporte económicos. Y esto en circunstancias que se han entregado concesiones para la explotación del Bórax por 150.000 hectáreas. Hay, además, más de 79.000 hectáreas de concesiones para las sales potásicas y por cierto es de esperar que la atención de los exploradores se dirija también hacia este importante recurso.

El azufre es asequible en gran cantidad en los muchísimos volcanes apagados de la Cordillera. Ello satisface de hace tiempo la demanda local de fabricación de mucha pólvora negra, necesaria para los cultivos de las nitreras de la región, y ahora encontrará ciertamente empleo en la producción de ácido sulfúrico en el grandioso establecimiento de Calama de la potente Sociedad norteamericana Dupont, para la fabricación de explosivos.

La Dupont, con su establecimiento de Calama, tendrá no solamente la ventaja del aprovisionamiento del azufre y del nitrato sino, además, una gran clientela susceptible de crecer, cerca de sus instalaciones: las grandes mineras de cobre de Chuquibambilla, otra empresa norteamericana, las refloradas y ya famosas mineras de plata de Sierra Gorda y de Caracoles, las innumerables mineras de cobre de la Cordillera de la costa y las cadenas metalíferas que están entre ésta y la cordillera de los Andes que se levantan desde el altiplano central, así como los trabajos del Puerto de Antofagasta, etcétera.

La caliza relativamente escasa en todo Chile, que importa casi todo el cemento que necesita de Europa, está presente en grandes yacimientos sobre la misma costa del mar, en las inmediatas cercanías Antofagasta. También muy cercano al mar y la ciudad, a lo largo de la vía férrea al cercanísimo puerto de Mejillones se encuentra abundantemente el yeso.

El alumbre, el sulfato de sodio, el de fierro, los carbonatos de sodio esperan también ser explotados.

No me detengo en los yacimientos de hematites en la cercanía del mar, ni en la presencia casi constante de oro en los minerales de muchas mineras cupríferas de la región.

Junto con esto, y en contraste con este alentador contexto de riqueza todavía latente en este verdadero grandioso cuadro de la naturaleza, está la indiferencia de los capitalistas chilenos para los negocios en el norte, aparte del ya acostumbrado negocio del nitrato, lo que la falta de caminos (apenas 1 km por cada 40 km cuadrados) y la ausencia, se puede decir absoluta, de agua y de fuerza motriz.

Los establecimientos de la Pampa salitrera queman no menos de 300.000 toneladas de petróleo al año. Este petróleo, ya caro desde su desembarco, debe todavía sufrir los costos de transporte por el ferrocarril a una tarifa notablemente alta.

El gran mineral de Chuquicamata, localizado en las cercanías de la pequeña ciudad de Calama, estación del ferrocarril Antofagasta Bolivia, importa por este medio, solo el petróleo necesario para el funcionamiento de los hornos y de las locomotoras, mientras que la energía para el tratamiento electrolítico del mineral, para los servicios mecánicos de preparación del mismo, para los talleres de reparación, para la iluminación, etcétera, viene de la central eléctrica de Tocopilla, en la costa.

Para dar una idea del potencial de esta empresa, cabe decir que la producción diaria es actualmente de cerca de 300 toneladas de barras de cobre electrolítico, para cuya producción se requieren 500.000 KWh. La central de Tocopilla -que comprende cuatro turboalternadores de 10.000 KVA, de los cuales sólo dos normalmente están función- provee sólo el 2%, de esta demanda.

Creo que este breve ejemplo es suficiente para justificar el voto que la continuación de los trabajos de investigación por mi felizmente iniciados en El Tatio confirme la posibilidad de concretar la instalación de una potente central eléctrica geotérmica cuya energía -distribuida a los usuarios de las

mineras, de las oficinas de la Pampa salitrera y la lejana ciudad- contribuya a la valorización de los grandes y no del todo conocidos recursos y riquezas naturales de la región de Antofagasta.

## **LAS MANIFESTACIONES DE VAPOR DE EL TATIO POSICIÓN GEOGRAFICA**

De la cadena de los Andes en el confín con Bolivia, a los 22°,20 de latitud sur, se destaca, girando al oeste, un breve cordón de montes que del Cerro Tatio (Monte Quemado) toma nombre. Estos montes están todos bajo la impronta de una actividad volcánica cesada en una época, geológicamente hablando, bastante reciente; quizás cuando ya habían aparecido los primeros habitantes humanos de aquella región.

Paralelamente a los cerros de El Tatio, al Oeste, se encuentra un grupo de alturas que culmina en la cima traquítica del Copacoya, al norte y con los Cerros de Tuckle al sur, quedando así delimitada y encerrada entre estos una vasta planicie inclinada ligeramente hacia el sudoeste, en la cual una multitud de vertientes esparcidas por toda el área, nacen las aguas del río Salado, que dada la poca pendiente de la planicie, en algunos lugares detenidas, y en el centro, recogidas en muchos brazos, serpentean hasta la confluencia con el río Tatio.

Estas vertientes son todas termales y están acompañadas por chorros de vapor, por lo cual la localidad ha tomado el nombre de "Hoyada de los géiseres".

En esta zona de las vertientes del río Salado, y sobre las faldas de los cerros circundantes, se extiende por más de ocho kilómetros de superficie, la concesión de la Comunidad Preliminar de El Tatio, constituida en Antofagasta para el estudio de un proyecto de explotación (a través de una central eléctrica similar a aquella de Larderello) de aquel vapor.

La altitud de la planicie donde surgen los géiseres, la cual como he mencionado, constituye en algún modo el cuerpo central de la concesión, es de casi 4.300 m.s.n.m. y la posición geográfica del Campamento, el cual, a los pies del cerro Copacoya, domina por algunos metros la misma planicie, está individualizada por las coordenadas:

68 1' 36'' longitud O. Greenwich  
22 20' 9'' latitud sur

## VIAS DE ACCESO

Es útil indicar de inmediato las distancias en línea recta, de El Tatio a los lugares más cercanos e importantes desde el punto de vista de las eventuales líneas de transmisión:

Del Océano, a la altura de Tocopilla, corren	230 km.
De Calama	100 km.
De Antofagasta	350 km.
De San Pedro- Estación F.C.A.B.	75 km.
De Chiu Chiu	65 km.
De San Pedro de Atacama	70 km.
De San Bartolo	50 km.
De Tuina La Nueva	70 km.
De la mina Caracoles	150 km.

Para llegar luego a la concesión de El Tatio, partiendo de Antofagasta, se pueden seguir los siguientes itinerarios:

Con el ferrocarril para Bolivia hasta la Estación de Calama (238 km. 2260 m.s.n.m.) y de allí a caballo, en otras dos jornadas por Chiu Chiu (km. 33 – 2320 m.s.n.m.) hasta el Campamento de El Tatio (70 Km.) pasando por las Vegas de Turi y el poblado indio de Toconce donde se pernocta.

Saliendo de Chiu Chiu, en vez de ir hacia las Vegas de Turi, a los pies del Cerro Ayquina, manteniéndose un poco más al Sur y atravesando esa pequeña cadena, se llega al poblado de Caspana, y al día siguiente a El Tatio.

La ruta por recorrer en ambos casos poco difiere en distancia y es igualmente accidentada. La Pampa, aparentemente plana está cortada de manera imprevista por profundos cañones cavados por los afluentes del río Salado.

Escondidos del viajero que recorre la Pampa, los villorrios indígenas de Toconce y Caspana están justamente contruidos en estos acantilados de paredes casi siempre verticales.

El trazado de una carretera, fácil hasta los Cerros de Ayquina, se volvería prácticamente imposible un poco más allá.

Si de Calama se sigue con la ferrovía hasta la Estación San Pedro, a los pies del imponente volcán homónimo, se puede en un día y medio, y por un camino mucho mejor, llegar a El Tatio.

Saliendo de la estación de San Pedro (312 km. de Antofagasta. 3223 m.s.n.m.) por la pampa desértica cubierta de fragmentos de lava, y siguiendo el ducto de agua potable al lado del camino del mismo acueducto, se llega a la casa del guardia pasado el km. 31, más allá se encuentra la casa de los Ayaviri en el valle del Inacaliri a 48 km. de la estación. Aquí el camino atraviesa el Valle y se mete al lado de los cerros para alcanzar el límite con Bolivia en el Silala, donde pasados seis kilómetros. después de la línea, se encuentran las obras de la represa del acueducto de Antofagasta (58 km. de San Pedro).

Para ir a El Tatio, desde la casa de los Ayaviri, conviene abandonar el camino de servicio del acueducto y dirigirse por el SE al collado entre el Cerro Toconce y el Apagado. Sobre este tramo ha sido suficiente el primer paso de carretas para obtener una trocha perfectamente practicable y, de allí en adelante, hasta la pampa que se extiende a los pies del Linzor.

Desde el Barranco de la Media Quebrada, que delimita esta pampa hacia el Sur, el camino para las carretas se ha debido fatigosamente buscar y construir. Este comienza, con dirección hacia el Este, a subir la Media Quebrada, manteniéndose sobre las faldas a la derecha hasta rodear la cabecera por lo menos durante cuatro kilómetros hacia la frontera, a 4500 metros sobre el nivel del mar. De la cabecera de la Media Quebrada, la dirección del trazado, a pesar de los numerosos serpenteos, se mantiene definitivamente hacia el Sur, con una pequeña desviación al poniente. Superando el paso del Cricero, a 4550 metros de altitud, el camino baja hacia la zona del Putungo, pasa el Hoyalar sin necesidad de un puente, con un fondo perfectamente sólido, y vuelve a subir hacia los pies del cerro Copacoya, donde se reúne con el antiguo camino de los Incas

que, de Bolivia, por el paso de Silala, va a San Pedro de Atacama; un poco más allá entra en la concesión y llega al campamento de El Tatio.

Para evitar las pendientes excesivas y las obras civiles, esta vía ha debido apartarse completamente del antiguo camino; a partir de la zona del Linzor, este último se mete por los roqueríos del valle de la Media Quebrada rodeando por el Noreste y el Este el macizo del Crucero, para alcanzar la depresión en la cual se recogen las aguas del Hoyalár. De esta, sale superando otros roqueríos y barrancos que se encuentran a los pies del Copacoya, poco antes de alcanzar el límite de la concesión.

La calzada por donde transitan las carretas, de la zona del Linzor al Campamento, se extiende por alrededor de 30 kilómetros, mientras la distancia en línea recta, que se separa ligeramente de la senda de los indígenas, no supera los 17 kilómetros. Las mejores condiciones, sin embargo, de la viabilidad conseguida por la calzada, son tales que la mayor distancia es ampliamente compensada, al punto que, en caso de urgencia se ha podido a través de esta llegar a la estación de San Pedro en sólo trece horas.

El trazado de esta calzada es susceptible de pequeñas mejoras, algo que en general es obligatorio, dadas las condiciones topográficas de la zona, enormemente accidentada un poco más arriba y un poco más abajo de la estrecha área en la cual esta discurre. El mayor inconveniente, actualmente, son tramos de terreno arenoso que presentan un grave obstáculo para el uso de vehículos. Sin embargo, más allá del hecho que un automóvil ya haya llegado a El Tatio, sería conveniente contemplar, en su momento, un transporte sobre rieles para las máquinas y el material destinado a una eventual planta.

## TOPOGRAFÍA Y GEOLOGÍA

Como he señalado, el centro de la concesión de la Comunidad Preliminar de El Tatio está constituido por la planicie en la cual surgen y se recogen las aguas del río Salado; planicie encerrada entre la cadena de El Tatio al Este, el Copacoya y los Cerros de Tukle, al Oeste. Dominan: el Cerro Tatio, 5 450

metros, el Cerro Volcán, 5 570 metros y el Copacoya, 4 820 metros. Estos cerros, aunque no lo parecen, son todos de origen volcánico, constituidos por emisiones, coladas y vetas de roca traquítica, granítica y porfiroide. Se encuentran, también, tobas y brechas, verdaderos despojos mortales que contienen fragmentos de pomez, que hacen más evidente la huella de erupciones relativamente recientes.

La planicie es totalmente blanca, debido a las incrustaciones de silicio y a efluvios de esencias salinas, indicios de una actividad hidrotermal imponente en el pasado, que continúa aún bajo la forma de emisiones de aguas, todas calientes, entre los 25 y los 87 grados centígrados, que manan de una infinidad de grietas, cavidades y conos de géiseres. Las manifestaciones más calientes emiten, naturalmente, abundante vapor, ya sea porque el agua a tal altitud hierve entre los 86 y 87 grados, ya sea porque el vapor de origen profundo, diferente, atraviesa la zona no acuífera sin condensarse, toda vez que este proviene de fracturas de un tamaño suficiente para que este fenómeno se produzca.

La acción del vapor y del agua recalentada, acidificada por el anhídrido carbónico, sobre las rocas que atraviesa, determina la alteración, mediante la eliminación del silicio que luego, en el exterior, vuelve a depositarse en incrustaciones irregulares materializadas en los bordes de las tazas y de las cuencas de las aguas hirvientes, formando montículos alrededor de los conos de salida de los géiseres.

Los géiseres más grandes pertenecen a una violenta fase de actividad ya extinta. Existen algunos de altura superior a los tres o cuatro metros, con anchas bases, de diez o más metros y cráteres que en la actualidad se encuentran invadidos de vegetación, relativamente próximos a desmoronarse a causa del mismo cono, que deja ver claramente los sucesivos estratos sobrepuestos, como un manto que lo constituye.

Observando atentamente estos fenómenos de alteración de los conos, que se han vuelto inactivos, dispuestos en grandes áreas circulares, marcadas por la diferencia cromática y el contorno de losas blancas de roca silíceas que se asoman apenas,

podemos llegar a determinar las huellas de géiseres aún más antiguos, cuyos detritus han contribuido en gran medida a formar la blanca extensión de la Hoyada de los Géiseres.

En los puntos donde el feldespato de las rocas se ha caolinizado, la arcilla diluida llena permanentemente las cavidades, junto con esto se observa poco anhídrido carbónico, y el que existe parece carecer de metano o de otros hidrocarburos.

En las laderas del Copacoya, un poco más arriba de la planicie de la Hoyada, según dos alineaciones que se encuentran a unos doscientos metros al Sur del Campamento, hay indicios de emisiones de vapor con ausencia de agua y dos verdaderos sofiones: el Tocchi y el Huracán.

Entre la dorsal de la Cordillera y la planicie de El Tatio, existen quebradas comprendidas entre morrenas que permiten imaginar cuán imponentes eran los glaciares que cubrieron estas altas zonas de Los Andes en la época glacial, posterior al tiempo en el cual el volcanismo las levantaba desde el fondo del mar jurásico.

En el fondo de estas quebradas, en correspondencia Este-Oeste, en el eje de la cima del Cerro Tatio, hay grandiosas manifestaciones de la actividad endógena residual, en salsas y sofiones del “Domeyko”, del “Reloj”, del “Pisis” y del “Philippi”.

El volcanismo, seguido de fenómenos hidrotermales que perduran, y la acción del glaciar desaparecido, son los dos factores esenciales que determinan la fisonomía de estas regiones en la actual estructura.

Una descripción, bastante detallada de los puntos más relevantes de la concesión, es ilustrada en el plano que acompaña este informe.

A los pies del Cerro Volcán y de la morrena que se destaca, yendo hacia el Oeste, está la parte más alta de la Hoyada de los Géiseres, en la cual se encuentran los vestigios de una muy antigua actividad hidrotermal revelada por la existencia de vastas áreas circulares, apenas hundidas y rodeadas de losas de roca silícea blanquecina, porosa y del todo similar a aquella que con capas sobrepuestas,

forma los conos de los géiseres todavía en actividad o recientemente inactivos pero que aún conservan toda su estructura.

La observación de estos conos con sus distintos rasgos de degradación nos lleva a visualizar claramente los últimos restos de los vestigios casi borrados de antiguos géiseres en estas losas, todavía dispuestas circularmente, y en el cúmulo de detritos de sílice que llenan la ligera depresión que éstos circundan.

En la misma parte alta del valle se encuentran también conglomerados y arenas de origen indudablemente volcánico, cementados por las aguas silicadas que corrieron alguna vez, y una especie de travertino también silíceo, poroso y muy ligero que, creo, debe haberse formado por las incrustaciones de vegetales cuya materia orgánica ha desaparecido, dejando justamente unos vacíos de forma tubular, rectos y ligeramente torcidos, densamente dispuestos en haces paralelos que vuelven muy ligera la roca.

El agua fría o apenas tibia comienza a aparecer un poco más abajo, especialmente en el llano a los pies del cerro Volcán, en una infinidad de pequeñas pozas reunidas caprichosamente entre ellas por pequeños arroyos, en un terreno formado por lapilli y detritus de la ya mencionada roca silícea. En este verdadero pantano no tardan en delinarse corrientes que, reuniéndose un poco más allá, donde se ensancha su lecho, forman la “laguna negra”, así llamada por el color oscuro que esta adquiere por las algas negras que proliferan en su fondo. De esta laguna sale el brazo principal del río Salado y comienza a recibir por la derecha una cantidad de pequeños arroyos de agua proveniente de innumerables manantiales termales y géiseres de la hoyada. Mientras que, desde lo alto, al Oriente de la Hoyada de los géiseres, estos bajan muy suavemente, por el Norte y el Oeste, descienden bruscamente, y en algunos puntos con verdaderos saltos de decenas de metros que revelan el desnivel de las áreas hundidas. Típicas, desde esta perspectiva, son las zonas del “San Román” y del “Campamento”.

El cerro Copacoya, en su ladera Oriente, se levanta desde un peldaño rocoso plano cubierto por una sutil arena silícea y, en algunas zonas, por bloques, a menudo enormes, de roca traquítica que emerge

de la masa interna, y en los que la erosión eólica ha forjado las más sorprendentes formas de torres de castillos, de monstruosos animales agazapados y hongos gigantes. Justamente por el borde septentrional de este peldaño se baja por un caos de bloques de traquita a la cuenca del San Román, rociada de salsas y de manantiales calientes, cuyas aguas reunidas en dos arroyos van a arrojarse al cauce principal del Salado, más allá de la laguna Negra. Esta cuenca, observada desde lo alto, ampliamente abierta hacia el Sur sobre la Hoyada, produce la impresión de un cráter lleno de materiales que se han despeñado desde los bordes. La impresión es aún más viva al descubrir numerosos penachos de vapor elevándose, aquí y allá, de pozas de agua hirviendo, y de varios cráteres de salsa que coronan montículos constituídos por salpicaduras de barro que se desprenden de las burbujas de vapor y de gas que agitan continuamente el barro que llena la cavidad, y que ciertamente, si bien durante mi estadía no tuve la ocasión de verificarlo, debe desbordarse a través de pequeños paroxismos eruptivos.

De esta manera, existen más de un centenar de ventilaciones esparcidas en una docena de hectáreas, de diámetro variable, que va desde una decena de metros hasta pocos centímetros. No en todas ellas la temperatura es igualmente elevada; hay también algunas apenas tibias. Aunque la materia, que las llena y que mana, pasa de líquida a tener la consistencia de un barro espeso como la pesce fundida, que agitada por un movimiento de grandes burbujas de vapor que borboteando produce un rumor en algunas pequeñas salsas, muy similar a un gruñido sordo, que los indígenas designan como “chanchos”.

Hacia la extremidad meridional de esta zona aparecen salsas donde comienzan a prevalecer vertientes de agua salada limpia, proveniente de cavidades incrustadas de sílice, y un gran cono de un géiser apagado que indica su límite. Más allá de ese punto, otras salsas se diluyen, aquí y allá, a los pies de la pendiente, y la falda de la colina presenta, según un alineamiento paralelo al corno del valle, líneas de terreno arcilloso enrojadas por el óxido de fierro, con agujeros y cortes de los cuales escapa vapor.

En una hondonada menor, en la mitad de una cuesta entre el San Román y el Campamento, se reúnen

las aguas de la laguna Negra y frente a este punto, en el llano, a los pies de la pendiente, aquellas de la laguna Azul, tibias y alimentadas por vertientes de agua caliente con burbujas de gas.

A poca distancia de la laguna Azul, un cono de un géiser apagado, cuyo cráter está invadido por vegetación herbácea, señala el principio de un área llena de manifestaciones activas. Se trata de simples fisuras, pequeños conos, montículos terminados en cráteres, todo ello incrustado de silíceo, formando a menudo bellísimas concreciones, que recubren también el suelo sobre el cual se debe proceder cautamente, advirtiéndose muy bien, en algunas zonas, la fragilidad de la costra sobre la cual se apoya el pie. Agua hirviendo, en agitación violenta, y vapor se desprenden de todos estos orificios eruptivos, entre los cuales destacan “el Toro” y “el Constante”, separados uno del otro por unos doscientos metros desde el Campamento; “el Toro” hacia el Norte, “el Constante” hacia el Sur.

El Toro con un ruido comparable al de una caldera que hierve a través de un gran tubo, emite continuamente vapor que se fuga de fisuras de pocos centímetros abiertas en una poza de casi un metro de diámetro, llena de agua en violenta ebullición., la cual se vierte al exterior en infinitos riachuelos entre incrustaciones depositadas por ella en las faldas del ancho cono, desde el cual otras numerosas bocas emiten vapor y agua hirviendo.

El Constante tiene, en cambio, su conito de sílice al centro de una gran piscina de pocos centímetros de profundidad, con un diámetro de unos veinte metros que él mismo ha construido con el silicio depositado por el agua que continuamente se vierte de un chorro de algunos metros de altura, violentamente levantado por el vapor.

El Toro y el Constante atraen de inmediato la atención de quien llega El Tatio desde la colina del Copacoya. Quien llega desde Caspana, subiendo por las laderas escarpadas del Cañon del Salado, ve a su derecha el río corriendo entre laderas abruptas y empinadas, rotas por fisuras por donde brotan arroyos de agua caliente, y se elevan penachos de vapor. Luego también sobre la otra orilla se notan vapores similares que brotan hasta en el lecho del

río, en las cercanías de la confluencia con el Río Tatio, esta orilla también presenta algunos pequeños manantiales de vapor en su lecho.

No todos estos manantiales son constantes, es más, la mayor parte tienen paroxismos separados por intervalos más o menos largos de tiempo, durante los cuales el agua parece acumularse y gradualmente calentarse en una vorágine interna de la cual viene luego violentamente expulsada, acompañada de vapor que, solo vuelve a caer al final de la erupción.

Esta intermitencia parece ser propia de este área, relativamente a baja altura. En el llano, hasta la cercanía del Constante, no se nota sino una pequeña variación, y no se puede excluir completamente que se trate de una simple apariencia, pero más abajo, en el medio de la llanura, se tiene un ejemplo notable en el geiser que justamente ha sido bautizado con el nombre de “Intermitente”. Éste brota de una grieta en el lecho de un arroyo, y no presenta en su exterior nada relevante durante largas horas. En sus fases de actividad, una columna de agua, espumante pero no alta, se levanta de la grieta dejando escapar el vapor en forma de un grueso y alto penacho imponente, que se ve desde el campamento cada mañana de las ocho a las nueve.

Mucho menos variable, es más, casi constante, “el Bertrand” en medio de un llano cubierto de concreciones, entre las cuales infinitas venas de agua caliente -casi un velo que cubre la superficie- que se reúnen un poco más allá en un arroyo que confluye a la izquierda en el Salado, se abre en una gran cuenca de agua hirviendo levantada en una alta cúpula espumante por el vapor que se libera profusamente.

Las abundantes aguas calientes y ácidas, que desde tiempos inmemoriales brotan desde muchísimos, y algunos imponentes, geiseres del área que se extiende al oriente y hacia el mediodía del “Bertrand”, han dejado huellas descriptivas de su acción sobre guijarros porfídicos de la morrena a través de la cual éstas se abrían camino. Profundas y caprichosas corrosiones han vaciado estos guijarros y algunas gruesas rocas de tal modo que engañan sobre su origen que, de manera espontánea, podríamos conectar con la idea una verdadera erupción volcánica de bombas y escoria.

Más en lo alto, en el fondo de las quebradas, al sur oeste del Bertrand, la actividad hidrotermal reaparece en las salsas hirvientes del “Reloj”, del “Domeyko”, del “Pisis” y del “Philippi”. Estas dos últimas están cercanas al origen del Río Tatio, a bastante altura (sobre los 4500 m.s.n.m.) y, a una distancia de 5 Km. Del Campamento.

El “Pisis” con su cráter de más de 5 m. de diámetro, de cual surge el vapor con un fuerte ruido, es un verdadero sofión que brota de una salsa de unos veinte metros de diámetro, con numerosos soplos de vapor a su alrededor.

Desgraciadamente, por su altura y relativa dificultad de acceso, lejos como está del centro de las manifestaciones, difícilmente se podría usufructuar. Este permanece, sin embargo, como una prueba de la extensión del área sobre la cual se despliega la actividad volcánica residual del Tatio.

En este contexto, hay que señalar que, a los pies del mismo Tatio, en la parte boliviana, existen géiseres y sofiones igualmente importantes, según me han referido unánimemente los indígenas. Si circunstancias independientes de mi voluntad no me lo hubiesen impedido, habría mandado la propuesta de extender mi exploración más allá de la frontera. No creo, sin embargo, por obvias razones políticas, que se pueda pensar en unir los dos centros de actividad en un único negocio. Cabe el mayor escepticismo en cuanto a la posibilidad de explotar los manantiales bolivianos con una empresa en sí, dadas las condiciones de absoluto aislamiento en que se encuentra la provincia del sur de Lipez, donde está el área boliviana de El Tatio.

Enfrente del Bertrand, en posición simétrica al mismo, en relación con el río Salado, encontramos un estrecho valle que se bifurca hacia lo alto en dos breves quebradas, con paredes a corte casi vertical en la traquita, en correspondencia con su cabeza, se elevan dos grandes formaciones rocosas con profundas divisiones verticales que hacen pensar en la estructura columnar de los basaltos. La cuesta que desciende al Oriente de este relieve de traquita da muestras de estar constituida por una roca poco coherente, con guijarros de piedra pomez incrustados, que a mi parecer es en realidad cinerita. Frag-

mentos de pomez se encuentran también al Sur y al Norte de este punto que parecería, por lo tanto, corresponder a uno de los últimos pequeños hogares de la auténtica actividad volcánica de El Tatio.

A cuatrocientos metros al Oriente de las pilastras de traquita antes mencionadas, en lo alto, sobre las laderas del cerro, sopla ruidosamente el vapor de la boca, de seis metros cuadrados, del Huracán.

Si imaginamos una línea directa a la cima de El Tatio, esta pasaría por una manifestación similar, localizada casi a la misma altura del Huracán y a la base de su lado oriental. Se trata de un pequeño sofión que me ha servido principalmente para mis observaciones, por lo cual el topógrafo fiscal lo ha bautizado con mi nombre.

En este se manifestó un fenómeno que vale la pena referir: su volumen de vapor, como he explicado en otro lugar, era escasísimo. Tras algunos días de experimentos, en diciembre de 1922, debido al clima, se debió abandonar el trabajo al aire libre y este sofión permaneció – sin poder desahogar su vapor- bajo presión muchas semanas. Se pudo entonces observar que el vapor salía del tubo de fierro con creciente violencia y que la vegetación en su entorno se iba secando con el aumento gradual de la temperatura del suelo, en un área crecientemente mayor. Se tuvieron sucesivamente fugas al interior de la campana de toma y la clara impresión de un notable aumento de su volumen. Pareciera que la presión en aumento hubiese removido algún obstáculo para la salida del vapor: ¿agua en la fisura de la cual éste se erogaba? Esta es la hipótesis a la cual he llegado observando una cosa similar en la perforación iniciada más tarde.

Observando la posición de las distintas manifestaciones descritas es fácil convencerse de la existencia de dos direcciones según las cuales éstas se encuentran aproximadamente alineadas, en una dirección Este – Oeste la primera y 50° Norte la segunda. Estas dos direcciones se repiten también en la orientación de los cursos de agua y en las fracturas del suelo fácilmente observables en el llano de la Hoyada de los Geiseros. No se trataría solamente de dos fracturas en las direcciones descritas y a través de las cuales el vapor profundo se abriría camino, sino de

dos sistemas de estas, se podría más bien observar que, aquellas más orientales en el primer caso y aquellas meridionales en el segundo, corresponden a las más antiguas manifestaciones de las cuales, como he dicho, subsisten apenas algunos vestigios. Es como si en frentes paralelos el fenómeno se hubiera gradualmente detenido y, al mismo tiempo, disminuido de intensidad: hoy vemos las vertientes más importantes activas a los pies del barranco que baja desde la Hoyada en su parte poniente y asimismo en la línea Pisis-Huracán. Pareciera, como en el caso de las vetas metálicas, también en este caso, que el área más rica, está representada por muchos manantiales localizados al sur del Constante con el Intermitente y el Bertrand.

Por analogía con otras manifestaciones similares, me parece que se debiera observar en los fenómenos de El Tatio las tardías consecuencias de una remotísima y enorme erupción de traquita, cuyas fumarolas, cumplido el habitual ciclo, después de ser fuertemente ácidas y sulfurosas, son hoy prevalentemente constituidas por vapor, acompañado de poco anhídrido carbónico, destinado en un lejano porvenir a quedar solo como un componente gaseoso de éste, transformado en simples mofetas y en vertientes de agua fría gaseosa.

## CLIMA

Si bien las observaciones han debido efectuarse con un escasísimo material en términos de instrumentos, las peculiares características del clima del Tatio se pueden resumir sintéticamente en los siguientes datos.

De acuerdo a la gran altura y la posición geográfica (zona tropical) la temperatura presenta fuertes variaciones, especialmente entre el día y la noche, siendo mucho menos importantes aquellas debidas a la estación del año. Encuentro señalado en mis apuntes temperaturas de unos diez grados sobre cero, a la sombra, en las horas más calurosas del verano, y temperaturas de los 10 a 18 grados bajo cero durante la noche. El hecho de haber encontrado en una veta de manganeso a una profundidad de un metro, en las cercanías del campamento, geodas con agua cristalizada, me induce a considerar una temperatura media inferior a cero.

La presión barométrica presenta pequeñas y lentas variaciones alrededor de los 458 m/m. (reducción hecha a cero) y con un máximo de 461 m/m. en algunas observaciones de diciembre a un mínimo de 455, en septiembre. Llama la atención lo seco del aire, incluso al menos observador, y es que, junto con los efectos de la altura, la constante y abundante actividad eléctrica hacen que el más leve roce y a menudo la simple exposición al sol, sobre una roca, de un objeto de lana o de piel sea suficiente para tener chispas crepitantes al contacto con la mano; basta romper un pedazo de papel para que éste se pegue a las manos y produzca, destellos y chispas al quitarlo, visibles por la noche.

Estos fenómenos, raramente observables en nuestros climas, son tan normales por estos lados, que los nativos se maravillan y lo tienen como una cualidad intrínseca de algunas sustancias.

El crepitar y los destellos de un poncho por el simple hecho de doblarlo y desplegarlo, es para el indio la mejor prueba de que está hecho verdaderamente de lana de vicuña.

No obstante, en contraste a cuanto he referido sobre estos fenómenos de electrización, no he tenido ocasión de observar, en mi estadía en El Tatio, descargas excepcionales de relámpagos, fuegos de San Telmo, u otras manifestaciones similares. Sin embargo, he observado constantemente los restos de las fulguraciones en la roca sobre los cerros de la cumbre del Copacoya y pequeñas fulguraciones con fusión en vidrio verde botella, en algunas partes en el llano.

Incluso las pocas observaciones hechas con el higrómetro confirman con cifras está notable y constante sequedad del aire. Excepcionalmente, en mañanas no muy frías, se ha obtenido por unidad 62 p.100; considerando que normalmente se tenía 25p. 100.

El viento es de una constancia notable. Regularmente comienza a soplar un viento frío a las 11 desde el SW, y dura, intensificándose en la tarde hasta casi el atardecer. Después de algunas horas en la noche el viento se despierta y continúa soplando hasta el amanecer, en dirección opuesta a la del día.

En primavera y en otoño, especialmente en septiembre, sopla con notable violencia, pero raramente alcanza la velocidad de un huracán.

Es oportuno notar que la dirección está perfectamente alineada con la posición de las cimas y con la dirección del valle. Se puede decir que las noches y las mañanas son normalmente tranquilas y serenas. En los meses de verano y en aquellos de invierno, con la entrada del viento hacia el mediodía, luego el tiempo se nubla y por la tarde llueve, nieva y graniza casi todos los días. Las mayores precipitaciones sin embargo no se tienen en invierno, como lo demuestra también el diagrama del caudal del río Salado, presentando una sola punta relevante, de pocos días, en febrero, que corresponde a un caudal seis veces mayor del normal.

No me ha tocado observar lluvias torrenciales ni nevadas excepcionales. La máxima altura de la nieve no ha pasado los cincuenta centímetros (15 de mayo). Por lo que me decían los indígenas de Caspana y Toconce, que estaban conmigo en el campamento, preocupados por tener que quedarse después del primero de mayo, debiera deducir que durante este 1922 el invierno fue suave.

## ESTUDIOS SOBRE EL VAPOR

Apenas formada la convicción que una gran cantidad de energía está en juego en los fenómenos que se presentaban en el área de El Tatio, en una extensión considerablemente mayor de terreno activo en relación con Larderello, se decidió proceder con un medio más seguro y atendible: el sondaje.

Contratiempos de todo tipo retardaron enormemente el inicio de los trabajos de perforación. Para lograr el transporte del equipamiento, fue en consecuencia urgente el estudio de una vía de acceso, y la consecuente construcción de unos treinta kilómetros de camino en alta montaña. Con una inminente época invernal y la preocupación justificada de ver paralizada cualquier actividad debido a los intensos fríos y las nevadas del invierno que se avecinaba, fue necesario construir casas bien protegidas y juntar combustible y provisiones.

A la espera de la sonda y del personal, el tiempo fue utilizado de distintas maneras, según las posibilidades que nos daba el clima, con visitas muy precisas a la concesión y sus entornos, levantamiento de datos topográficos y tomas de muestras, observaciones y estudios sobre las aguas y el vapor.

Con un embudo de lata de cerca de un metro de diámetro fue posible cerrar la boca del pequeño sofión en la falda de la colina, a los pies del Copacoya que, como he mencionado, fue bautizado como sofión "Tocchi". Su contorno fue oportunamente cubierto con paja y tierra, el poco vapor que salía del tubo era conducido por una pequeña cañería de tres cuartos de pulgada al aparato que hice construir en Antofagasta para su análisis.

Del mismo modo que cuando practicamos en casa, el vapor natural se condensa en un serpentín de cobre, bañado con estaño en su interior e inmerso en un refrigerante, el agua de condensación se recoge en una botella de Wolf, y el gas aspirado en recipientes de latón se colecta de la misma manera para ser medido a presión y temperatura ambiente.

Sin reportar aquí los resultados de los análisis específicos, será suficiente indicar el resultado medio:

Sobre 100 Kg. de agua de condensación, se colectaron en promedio 16,8 litros de gas, reducción realizada a la temperatura de cero grados y a la presión de 760m/m de mercurio; constituido de anhídrido carbónico (98%).

Con suficiente aproximación, siendo el p.s. del anhídrido carbónico de 0° y 760 m/m, 1,98, se puede entonces dar, en peso, la composición del vapor de aquel sofión.

Vapor kg	1000
Gas	0.33

Proporción de gas verdaderamente mínima, que ojalá se mantuviese en el vapor procedente de las perforaciones, lo cual es por otra parte muy probable.

En el agua de condensación que presentó una ligera reacción ácida, no se encontraron los ácidos del azufre. Un ligero enturbiamiento de nitrato de plata, me hace sospechar que existen pequeños

indicios de ácido clorídrico y, con la típica prueba del papel de cúrcuma, casi negativo, pequeñísimas trazas de ácido bórico.

Un análisis del agua de los manantiales calientes, realizado con medios bastante rudimentarios, que eran los que tenía a mi disposición en El Tatio, ha arrojado en promedio:

por litro:

sales cristalizadas	14,60 g
silicio amorfo seco	0,53 g
arena	0,07 g
<b>TOTAL</b>	<b>15,20 g</b>

como residuo seco de la evaporación.

La sal, así recogida, está constituida casi enteramente por cloruros. El ácido bórico, aunque en pequeña proporción, se identifica claramente ya sea con la prueba del papel de cúrcuma, en presencia de ácido sulfúrico, ya sea con la coloración de la llama de alcohol. Como base, sin duda está presente el sodio, quizás el potasio. El calcio y el magnesio están prácticamente ausentes.

En la descripción general de la concesión, he ya señalado la presencia de afloramientos salinos cubrientes en algunos puntos en el suelo de la Hoyada de los géysers. En la porción de planicie comprendida entre el Salado y los arroyos que bajan desde el Oriente, en la zona del Bertrand, estos afloramientos son particularmente abundantes. Estos estarían constituidos por una parte insoluble, muy probablemente formada por sulfato de calcio y silicio, y una parte (la prevalente) perfectamente soluble en agua, que se colora en amarillo; tratada con alcalinos se obtiene de esta solución el precipitado blanco característico del aluminio. Excluida la presencia del cromo y del manganeso, no me queda más que el fierro para explicar la coloración amarilla que he señalado.

Analizando los ácidos de la solución encontramos que prevalece el clorídrico, junto con los ácidos sulfúrico y bórico. Parecería, en consecuencia, que dichos afloramientos deberían contener: sulfato de calcio, silicio, sulfato de potasio, sodio y aluminio, además de cloruro de sodio. Por razones de analo-

gía con lo que se ha verificado y se puede observar en terrenos similares, es posible pensar que los sulfatos solubles representados por el común alumbre; y que el ácido bórico esté combinado con el sodio.

## TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

La perforación, iniciada con gran dificultad a fines de junio, en un punto muy cercano al campamento donde se tenían indicios de pequeñas emisiones de vapor detenidas desde hace tiempo, que cruzaban un poco más de tres metros de terreno suelto y poroso, constituido por detritus y leves capas de geyserrita, embebidas de agua, ha penetrado en una roca compacta y dura de tipo traquíutico. Este tipo de roca se ha mantenido constantemente, hasta encontrar pequeñas fisuras, casi siempre verticales, de las cuales se escapa como lo ha demostrado un repentino incremento de la temperatura, el vapor. A los cuarenta y ocho metros, un mayor volumen de vapor ha provocado fenómenos notables que será interesante resumir. La temperatura ha aumentado hasta los 77 grados en la parte más cercana a la superficie de la columna de agua introducida en el agujero por las labores de perforación. Las burbujas de ácido carbónico se han hecho más numerosas, el agua contenida en el agujero ha comenzado a salir con un chorro siempre potente, del tubo que constituye la línea del asta de la barra rotatoria de perforación que operábamos. Tras algunos instantes, acompañado por un ruido, una primera bocanada de agua salió de la perforación en un chorro potente y de inmediato con gran violencia, un chorro de unos veinte metros de alto, conformado por agua finamente pulverizada y vapor, que ha vaciado completamente el agujero. Una vez detenido el chorro, sólo ha continuado saliendo vapor durante unos veinte minutos y ha ido disminuyendo lentamente. Después de una media hora, el ciclo se repetía y así durante una media jornada, deteniéndose solo cuando se ha vuelto a acumular el agua.

Con la presencia del agua, mantenida fría por el bombeo desde el exterior, fue posible retomar el trabajo y continuar la perforación hasta los 50 metros. Se provocó entonces la salida de una porción de agua mediante el trabajo de rápido alzamiento y hundimiento de la sonda. Los fenómenos ya descritos se manifestaron con mayor violencia

y no se interrumpieron a partir de ese momento, aumentando a tal punto, según las noticias que me llegaban desde El Tatio, que fue imposible reanudar el trabajo, pues las sucesivas expulsiones de agua cesaron y dieron lugar a un continuo flujo de vapor.

Analizando estos fenómenos hemos llegado al convencimiento del origen profundo del vapor y de la penetración de agua fría en los estratos superiores del terreno, de naturaleza porosa, como hemos visto.

Tras una violenta expulsión de agua por el enfriamiento, debido también a la expansión, el libre goteo de este agua fría al interior del pozo fue suficiente para condensar el vapor aún escaso, que escapa de las fisuras del fondo y de las paredes. Se va formando así una columna de agua rápida y suficiente para tener contenido, con su presión hidrostática, el vapor que, desde ese momento, para de salir de la boca del tubo de perforación. Pero, en contacto con las paredes calientes, calentadas también por el vapor, que se va condensando, el agua que entra termina por alcanzar la temperatura de ebullición y luego comienza a agitarse debido a las burbujas de vapor que se despliegan, provocando una tendencia al levantamiento de toda la columna que va acompañada del empuje siempre creciente del vapor, que va acumulándose en el fondo. En un momento, cuando el agua alcanza la altura del agujero externo, se produce un primer desbordamiento y luego una repentina disminución de peso de la columna, contrastando la presión del vapor, que toma entonces ventaja y echa violentamente, a gran altura, como hemos visto, lo poco que quedaba. Estamos entonces en las mismas condiciones iniciales, y el fenómeno de las emisiones alternativas de vapor y de agua, continúa, regulado -por el tiempo que transcurre entre una fase y otra- en función de la relación en que se encuentran el agua y el vapor. Con la continuación de la perforación hasta un cierto punto, con una cantidad suficiente de vapor, éste arrastrará mecánicamente la poca agua, al entrar en la perforación, impidiendo de esa manera su acumulación, dejando sin efecto la causa de las periódicas interrupciones de su flujo. Hay también que señalar que con el aumento del vapor se produce al interior de la perforación una presión suficiente que expulsa el agua de las fisuras por las cuales se abre camino, dado lo pequeño de la carga. Dejé El Tatio el

23 de septiembre recomendando la continuación de la perforación iniciada hasta alcanzar un centenar de metros de profundidad, dando la indicación para otros pozos en el área del Tocchi y del Bertrand.

Di también las instrucciones necesarias para que me fueran informadas las mediciones de temperatura y de presión, a partir de las cuales fuera posible realizar un cálculo de su volumen. La primera perforación era en esos días de 50 metros de profundidad y presentaba los fenómenos que ampliamente he descrito, pero aquello, no obstante, estaba todavía lejos de representar un volumen satisfactorio.

La misma medición no se podría haber ejecutado con nuestros métodos de Larderello dadas las bruscas variaciones de la presión, debido, como he mencionado, a la presencia del agua. Un posterior telegrama, que me llegó cuando todavía estaba en Antofagasta, a la espera del barco, con el cual debía emprender mi viaje de regreso, anunciaba un enorme aumento del caudal y la continuidad del chorro de vapor, razón por la cual el perforista solicitaba iniciar la perforación de un segundo pozo. Recientísimas noticias nos informan que este segundo pozo ha alcanzado en los primeros 20 metros la temperatura de 80° C y nos hace esperar una inminente salida de vapor.

Pero más allá de las noticias sobre la presencia de vapor, de cuya existencia no dudo, espero recibir datos numéricos a partir de los cuales hacer, al menos de manera general, una estimación del vapor efectivamente explotable en determinadas condiciones de temperatura y de presión.

## **ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA DISPONIBLE**

Ante la imposibilidad de hacer una evaluación efectiva de la cantidad de vapor disponible y prácticamente explotable, hasta que las perforaciones no nos permitan realizar mediciones de caudal y además coleccionar nuevos datos sobre temperaturas y composición química del vapor de origen profundo (temperatura, ciertamente superior a los 87 y 90° hasta ahora observados; composición, muy probablemente análoga a aquella ya testeada) nos debemos necesariamente limitar a estimaciones sugeridas por el aspecto grandioso del fenómeno,

por la extensión del terreno activo, que al menos quintuplica a la de Larderello y, finalmente, a partir de una evaluación general de la energía actualmente distribuida en el calentamiento de las aguas del Rio Salado. Estas aguas, que provienen de las nieves de los montes circundantes, a una temperatura próxima a cero grado, son calentadas por el vapor que se despliega desde el magma volcánico profundo, hasta la temperatura de 20° que éstas tienen a la salida de la Hoyada. A estos veinte grados de calentamiento de los 500 litros de caudal del Salado, corresponden 10.000 calorías y por la equivalencia mecánica del calor (425 kilogramos por caloría), una potencia teórica de 57.000 C.P.

Habiéndome sucedido en otra ocasión, el tener que traducir en cifras para una persona de negocios mis impresiones sobre El Tatio, señalé la posibilidad de instalar una central de 50.000 kW. Sostuve además, como sostengo todavía en base a las características mencionadas, que tal potencia es perfectamente alcanzable, siempre y cuando la continuación de los muy bien ejecutados trabajos de perforación confirmen la posibilidad concreta de obtener vapor en las condiciones deseadas de temperatura y composición química.

Firmado, Ingeniero Ettore Tocchi  
Castiglioncello, enero de 1923

## Bibliografía

**Autores varios**, *Mesa de Geotermia: Rol de la geotermia en el desarrollo de la matriz energética chilena*. Santiago de Chile, Centro de Energía de la Universidad de Chile y Fundación Chile. Informe final al Ministerio de Energía (julio de 2018)

**Bona P. y Coviello M.F.**, *Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur: Una propuesta metodológica*. Santiago de Chile, CEPAL (2016)

**Bringhenti P., De Leva M.**, *Producción de energía eléctrica con fuerzas endógenas del Tatio (Antofagasta)*. Santiago de Chile, Boletín Minero de la Sociedad Nacional de Minería n°581 pp. 502-509 (septiembre 1948)

**Cappetti, Guido**, *Sviluppi tecnologici e strategie per la coltivazione dei campi geotermici: l'esempio di Larderello*. Pisa, Enel Generazione ed Energy Management - Produzione Geotermica (abril de 2006)

**Cattaldi, Raffaele**, *De la celebración del centenario de la industria termoeléctrica al desarrollo de la energía geotérmica en Italia en el siglo XXI*. Geotermia/Revista Mexicana de Geoenergía, Vol. 19 (julio-diciembre 2006)

**Cattaldi R., Suárez M.**, *Our Geothermal Legacy: A Historic Overview*. Melbourne (Australia), paper adaptado para el Congreso Mundial de Geotermia 2015

**Contini, Remo**, *Missione in Cile*. Revista Larderello/Rassegna di Studi e di Attività Aziendali, n°3, (mayo-junio 1960)

**De la Paz Mellado, Verónica**, *Energía geotérmica: principales usos; ejemplos de incentivos para su desarrollo*. Valparaíso, Asesoría Técnica Parlamentaria (diciembre 2019)

**Dickson, Mary H. y Fanelli, Mario**, *Renewable energy*. Londres, Routledge (2011)

**El Mercurio de Antofagasta**, *Riqueza colosal*. Entrevista a Ettore Tocchi (edición del 3 de noviembre de 1921)

**El Mercurio de Antofagasta**, *Comunidad Preliminar del Tatio*. Sobre informe de Ettore Tocchi a la Comunidad Preliminar del Tatio (edición del 16 de diciembre de 1921)

**Grebe, María E. e Hidalgo, Blas**, *Simbolismo atacameño: un aporte etnológico a la comprensión de significados culturales*. Santiago de Chile, Revista Chilena de Antropología n°7, 75-97, Universidad de Chile (1988)

**Huttrer, Gerald W.**, *Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report*. Paper presentado al Congreso Mundial de Geotermia 2020

**Morata D., Aravena D., Lahsen A., Muñoz M y Valdenegro P.**, *Chile Update: The First South American Geothermal Power Plant After One Century of Exploration*. Paper presentado al Congreso Mundial de Geotermia 2020

**Recabarren Rojas, Juan F.**, *Episodios de la vida regional*. Antofagasta, Ediciones Universitarias Universidad Católica del Norte (2002)

**Suárez Arriaga, Mario**, *A Short Story of the Long Relationship Between The Human Race and Geothermal Phenomena*. Antalya (Turquía), Congreso Mundial de Geotermia 2005

**Tocchi, Ettore**, *Il Tatio*. Castiglioncello (Livorno), Informe para Larderello S.p.A., Ufficio Geologico (enero 1923)

**Tuck, F.E.N.**, *The Utilisation of Thermal Steam at Larderello, Italy*. Informe para el New Zealand Geological Survey (diciembre 1944)

**Unione Geotermica Italiana**, *La Geotermia: Ieri, Oggi, Domani/Geothermal Energy: Yesterday, Today, Tomorrow*. Pisa, Edizioni ETS (segunda edición, noviembre 2007)







enel

 PROCULTURA  
FUNDACIÓN

  
BIBLIOTECA NACIONAL  
DE CHILE

  
Ministerio de  
los Cultivos,  
las Artes y  
el Patrimonio  
Gobierno de Chile

PROYECTO ACOGIDO  
LEY DE  
DONACIONES  
CULTURALES