



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“ESTUDIO COMPARATIVO DEL IMPACTO
AMBIENTAL ENTRE DOS SISTEMAS GEOTÉRMICOS VECINOS:
VALLE IMPERIAL, CA. EEUU Y CERRO PRIETO, BC, MÉXICO”**

TESIS PROFESIONAL

**Que para obtener el Título de:
Licenciatura en Ingeniería Ambiental**

Presenta:

MARÍA ERIKA CUAYA SIMBRO

**Director de Tesis:
Dra. María Dolores Guevara Espinosa**

**Co-director de Tesis Externo:
Dr. Margarito Quintero Núñez,
Universidad Autónoma de Baja California**

Puebla, Pue.

Enero 2016

**La disciplina tarde o temprano
vencerá la inteligencia**

Proverbio Japonés





BUAP

Oficio No. FIQ/AC/1317/2015

Asunto: Registro de Tema de Tesis

**C. MARÍA ERIKA CUAYA SIMBRO
PASANTE DE LA LICENCIATURA
EN INGENIERÍA AMBIENTAL
P R E S E N T E:**

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental cuyo título es el siguiente:

“ESTUDIO COMPARATIVO DEL IMPACTO AMBIENTAL ENTRE DOS SISTEMAS GEOTÉRMICOS VECINOS: VALLE IMPERIAL CA. EEUU Y CERRO PRIETO B. C. MÉXICO”

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA**

Director de Tesis: Dra. María Dolores Guevara Espinosa

Co-Director de Tesis: Dr. Margarito Quintero Núñez (Universidad Autónoma de Baja California)

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **ÚNICAMENTE POR UN AÑO.**

ATENTAMENTE

“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”

H. Puebla de Z., 30 de noviembre del 2015

**M.I.C. MA. GPE. JITA VÁZQUEZ E. DE LOS MONTEROS
SECRETARIA ACADÉMICA**



C.c.p. Director de Tesis: Dra. María Dolores Guevara Espinosa

Co-Director de Tesis: Dr. Margarito Quintero Núñez (Universidad Autónoma de Baja California)

Minutario Facultad de Ingeniería Química



AGRADECIMIENTO

Definitivamente las cosas comienzan a partir del momento en que las deseas, cuando tienes las ganas, las fuerzas y la determinación. La vida nunca será fácil, ni todos los que te rodean serán la mejor compañía, sin embargo la vida es eso, aprender de todo aquello que tienes en frente o bien, al lado, aprender a valorar cada momento, cada lugar, saborear los logros y superar los fracasos. Calcular la vida en kilómetros recorridos, en sueños cumplidos y no solo en meses o años.

Sin duda agradezco a cada uno de ustedes que han hecho maravilloso mi mundo, tanto a familiares, profesores, colegas, amigos, conocidos y hasta desconocidos que me han recibido con la mejor disposición en aquellos días que decidí recorrer con mis propios pies todos esos hermosos lugares, ustedes llegaron a ser tan cercanos, me enseñaron que aún hay bondad en el mundo y que no se necesita ser precisamente hermanos de sangre para llegar a tenerles profundo cariño. Durante el trayecto aprendí que nuestro planeta es tan colorido y diverso, que la felicidad no está en el dinero, pero no por ello pasa a ser irrelevante, que a pesar de las fronteras, la realidad es que no existen barreras, la única que conozco es la estrechez de mente que algunas personas tienen y le adjudican la culpa constantemente al sistema, al idioma, la religión, la cultura, siendo que carecen de tolerancia y respeto hacia su semejante.

De ante mano, disculpa que no coloque específicamente tu nombre, no creas que hacia ti es muy poco mi reconocimiento o cariño, es sólo que se me hace un acto poco amable y selectivo disponer de contados renglones para mencionar a todas las personas con quienes me siento profundamente agradecida de haber conocido a lo largo del camino, mismo que aún pinta paisajes prometedores.

ÍNDICE GENERAL

	Página	
Agradecimiento	I	
Índice general	II	
Índice de gráficas	III	
Índice de tablas	III	
Índice de figuras	IV	
Justificación	V	
Objetivos	VI	
CAPÍTULO I		
1	Resumen	1
1.1	Marco histórico y geográfico de los Sistemas Geotérmicos de Mexicali y Valle Imperial	2
1.2	Características de los Sistemas Geotermoeléctricos en la frontera CA-BC	6
1.2.1	Fallas geológicas	6
1.2.2	Profundidad de los pozos	8
1.2.3	Extensión del yacimiento	9
1.3	Derecho y administración de suelo e infraestructura	12
1.4	Proceso geotérmico y operación comercial	14

CAPÍTULO II

2	Impacto Ambiental	25
2.1	Los contaminantes químicos y sus efectos	25
2.2	Impactos sobre el medio físico	33
2.3	Normatividad	36
2.4	Impacto Económico	39

CAPÍTULO III

3	Planteamiento de propuestas estratégicas para mitigar el Impacto Ambiental presente en CGCP	42
---	---	----

CAPÍTULO IV

6	Conclusión y propuestas	49
	Bibliografía	55

ÍNDICE DE GRÁFICAS

1	Tendencia histórica de producción de vapor y número de pozos integrados (arriba) y producción promedio de vapor por pozo (abajo) en CGCP.	10
---	---	----

ÍNDICE DE TABLAS

1	Capacidad instalada y generación geotermoeléctrica en México	3
---	--	---

2	Utilización de la energía geotérmica para la generación de energía eléctrica en Cerro Prieto datos actualizados hasta el año 2008	15
3	Operación Comercial en Valle Imperial	23
4	Composición química de aguas geotérmicas de Cerro Prieto	30
5	Composición típica del efluente de caldera de una unidad de 250 MW	31
6	Límites de emisión de contaminantes de las unidades 1, 2, 3, 4 y 5 de la Región 1 de Valle Imperial	33
7	Usos directos de la geotermia	48

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Ubicación de las plantas geotérmicas en Valle Imperial	5
2a.	Ubicación de las plantas geotérmicas de Cerro Prieto, Valle de Mexicali	7
2b.	Vista aérea CGCP	7
3	Laguna de evaporación en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto	9
4	Red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto	16
5	Deposición del agua residual en CGCP	27
6	Zona que se destinó al proyecto de extracción de KCl a partir de la salmuera residual	51
7	Infraestructura del Campo Geotérmico de Cerro Prieto	53
6	Panorama de los ejidos cercanos a CGCP	54



JUSTIFICACIÓN

El presente estudio es de vital importancia ya que en los últimos años la generación de electricidad a base del vapor geotérmico se ha ido desarrollando en ambos Valles (Mexicali e Imperial) a gran escala, lo cual ha contribuido a la pérdida de suelos agrícolas en el Valle de Mexicali, por ejemplo la Central Geotermoeléctrica de Cerro Prieto de la CFE –la segunda más importante en el ámbito internacional-, contamina los suelos debido a la cantidad de sal que se acumula en los terrenos aledaños y dado que se extiende cada vez más, ha provocado que los terrenos ubicados en el ejido Nuevo León, que hace tiempo tenían una tierra muy fértil donde se sembraban hortalizas, se han convertido en yermos por la salinidad que queda como residuo de la emanación del gas endógeno que sale de las plantas de la CFE, el cual contiene litio, cadmio, arsénico, ácido sulfúrico, amoníaco y boro, los que además del suelo contaminan el aire y por lo tanto generan graves problemas a la salud pública. Por otro lado, estudios recientes han registrado emisiones potenciales de benceno, amonio, metano, dióxido de azufre (SO₂), NO_x y contaminantes traza peligrosos [HAPs (Hazardous Air Pollutants)] incluyendo: tolueno, xileno, etilbenceno, Rn-222 y metales pesados como As, Hg, Pb y Zn, por todo lo anterior se considera imprescindible abordar el tema de manera objetiva y clara a fin de proponer medidas que permitan mitigar el impacto ambiental generado por ambos sistemas geotérmicos que son tan importantes para la región fronteriza México-Estados Unidos y la salud de la comunidad fronteriza.



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los problemas que generan los dos sistemas geotérmicos binacionales, optimizar un uso más integral del recurso y plantear formas de mitigar el impacto ambiental donde así lo requiera, teniendo como premisa la salud de la comunidad y de los trabajadores.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- * Analizar y comparar la política ambiental que regula cada Valle (Mexicali/Imperial) y determinar si existe alguna relación directa entre la normatividad y el grado de impacto.

- * Proponer medidas correctivas enfocadas al Campo Geotérmico de Cerro Prieto sobre los impactos físico-químicos en el medio ambiente, en la seguridad ocupacional, así como en la salud de los trabajadores de la planta y de la comunidad vecina.

- * Proponer un uso integral del recurso geotérmico en términos no eléctricos.

1. RESUMEN

El Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) se encuentra en el Valle de Mexicali, es uno de los campos geotérmicos más importantes de Latinoamérica (540 MW). Por otro lado el sistema geotérmico en el Valle Imperial se extiende en varios sitios (Heber, East Mesa, Mar Salton, Brawley y Calipatria), su capacidad es superior a 704 MW. El desarrollo de cada sitio ha sido diferente en ambos valles, teniendo en cuenta varios factores: derechos de tierra, preparación del terreno, el tipo de depósito, la temperatura, la profundidad de los pozos, la perforación, la composición química, la producción, la utilización, el confinamiento de los residuos (salmuera), las medidas que se toman para amortiguar las incrustaciones de sílice en los pozos, la legislación y la política ambiental.

Al visitar las plantas geotérmicas en ambos lados de la frontera se pueden contemplar grandes diferencias en relación a los impactos ambientales sobre la base de su desarrollo. Después de cuantificar estos contrastes de manera objetiva sobre la base de información científica, se realiza la propuesta de medidas correctivas o de mitigación sobre los agentes químicos y sus efectos, sobre los impactos físicos en el medio ambiente, el impacto socio-económico, y, finalmente, en la seguridad ocupacional y la salud de los trabajadores de la planta y de la comunidad vecina.

Estas propuestas se enfocaron con énfasis en el lado mexicano, ya que en la actualidad ambos sistemas geotérmicos están situados cerca de áreas urbanas

que no cumplen con las normas establecidas por las agencias ambientales teniendo en cuenta la calidad del aire de la zona -la EPA para el caso de Valle Imperial y SEMARNAT en lo que respecta a Cerro Prieto-. En este trabajo se describen las diferencias de contraste entre los impactos ambientales detectados en ambos sistemas geotérmicos que son tan importantes para la región fronteriza México-Estados Unidos y la salud de sus habitantes.

Palabras clave: *sistemas geotérmicos, Valle Imperial, Mexicali, impacto ambiental, EPA, SEMARNAT.*

1.1 MARCO HISTÓRICO Y GEOGRÁFICO DE LOS SISTEMAS GEOTÉRMICOS DE MEXICALI Y VALLE IMPERIAL

Los valles de Imperial y Mexicali están localizados como parte del desierto de Sonora, una región árida bajo el nivel del mar, comparten el mismo valle que se encuentra dividido por una frontera política. Baja California constituye una isla energética en el sentido de que se importa casi la totalidad de sus recursos energéticos (con la excepción de calor geotérmico y energía solar) desde fuera de la región. No está conectado a las líneas de distribución de la parte continental de México y cuenta con más vínculos con los EE.UU. como consecuencia de su proximidad. Valle Imperial aprovecha la energía geotérmica, solar, eólica y micro-hidroeléctrica en forma de recursos nativos (Quintero, *et al*, 2015).

En la Ciudad de Mexicali, estado de Baja California, los sectores industriales y residenciales son los más importantes consumidores de electricidad, seguidos por los sectores comerciales, de riego y de alumbrado público. Esto difiere de los patrones de uso de electricidad en el Valle Imperial, California, en el que los sectores comerciales y residenciales consumen más electricidad que el sector

industrial. Esta tendencia contribuye a establecer el perfil de desarrollo de cada valle (Quintero y Sweedler, 2005a).

Mexicali

México ocupaba el tercer lugar a nivel mundial en la explotación de la energía geotérmica, con una capacidad instalada de 953 MWe en cuatro campos geotérmicos de elevada entalpía, con una generación anual de 6280 GWh en 2004 (Tabla 1), lo que significa el 3.3% de la generación eléctrica en el país (Gutiérrez y Quijano, 2005).

Tabla 1. Capacidad instalada y generación geotermoeléctrica en México

	Cerro Prieto	Los Azufres	Los Humeros	Las Tres Virgenes	Total
Capacidad instalada (MWe)	720	188	35	10	953
Generación anual de electricidad (GWh)	5112	852	285	33	6280

(Fuente: Gutiérrez-Negrín y Quijano- León, 2005)

El Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) contiene un yacimiento geotérmico de líquido dominante, situado en un entorno de roca sedimentaria. Está ubicado en una cuenca de tipo *pull-apart*, formada por los sistemas de fallas Cerro Prieto e Imperial, los cuales forman parte del sistema de fallas de San Andrés (Aguilar, 2010).

El CGCP empezó operaciones comerciales en 1973, y a partir de esa fecha se han perforado pozos periódicamente para mantener la capacidad instalada y

proporcionar apoyo a un crecimiento potencial, extrayendo vapor geotérmico que se distribuye a las diferentes centrales generadoras. Actualmente tiene una capacidad instalada de 540 MW para cuya generación se requieren aproximadamente 5800 toneladas por hora (t/h) de vapor (Aguilar, 2010). De acuerdo a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), compañía eléctrica propiedad del Estado de México el compromiso se ha establecido para proporcionar fondos para un proyecto geotérmico cuyas operaciones se han previsto poner en marcha en 2017. Dicho proyecto consistiría en una unidad de condensación de 270 MWe, (Monitor Económico , 2014).

Valle Imperial

California representa aproximadamente el 90 por ciento de la capacidad instalada de energía geotérmica en Estados Unidos de América. Las principales áreas de desarrollo son los Géiseres, Valle Imperial, Salton Sea (Mar de Salton) y Cosco (Lund, *et al*, 2005). Valle Imperial genera la segunda cantidad más grande de electricidad de origen geotérmica en los EEUU., después de los Géiseres, en Santa Rosa, California, EE.UU.

Las instalaciones geotérmicas de Valle Imperial se encuentran en el sur del estado (Fig. 1), cerca de la frontera de California / Arizona, a lo largo del Mar Salton. Sus centrales eléctricas geotérmicas entraron en servicio, a partir de 1982. Las reservas probadas fueron pronosticadas para alcanzar 1.105 MW, y se calcularon hace 9 años reservas potenciales de 2.330 MW (Quintero y Sweedler, 2005b).

El Distrito de Riego Imperial (IID por sus siglas en inglés), se encarga de la gestión de los suministros de agua y electricidad, está ubicado en el Valle Imperial y su área de servicio abarca 6,471 millas cuadradas (16,790 kilómetros cuadrados), que incluye el Condado de Imperial y partes de Riverside y San Diego. Valle

Imperial cuenta con varias plantas de energía, incluyendo la energía geotérmica, micro-hidroeléctrica y térmica (Quintero y Sweedler, 2005a), y últimamente también plantas fotovoltaicas y eólicas.

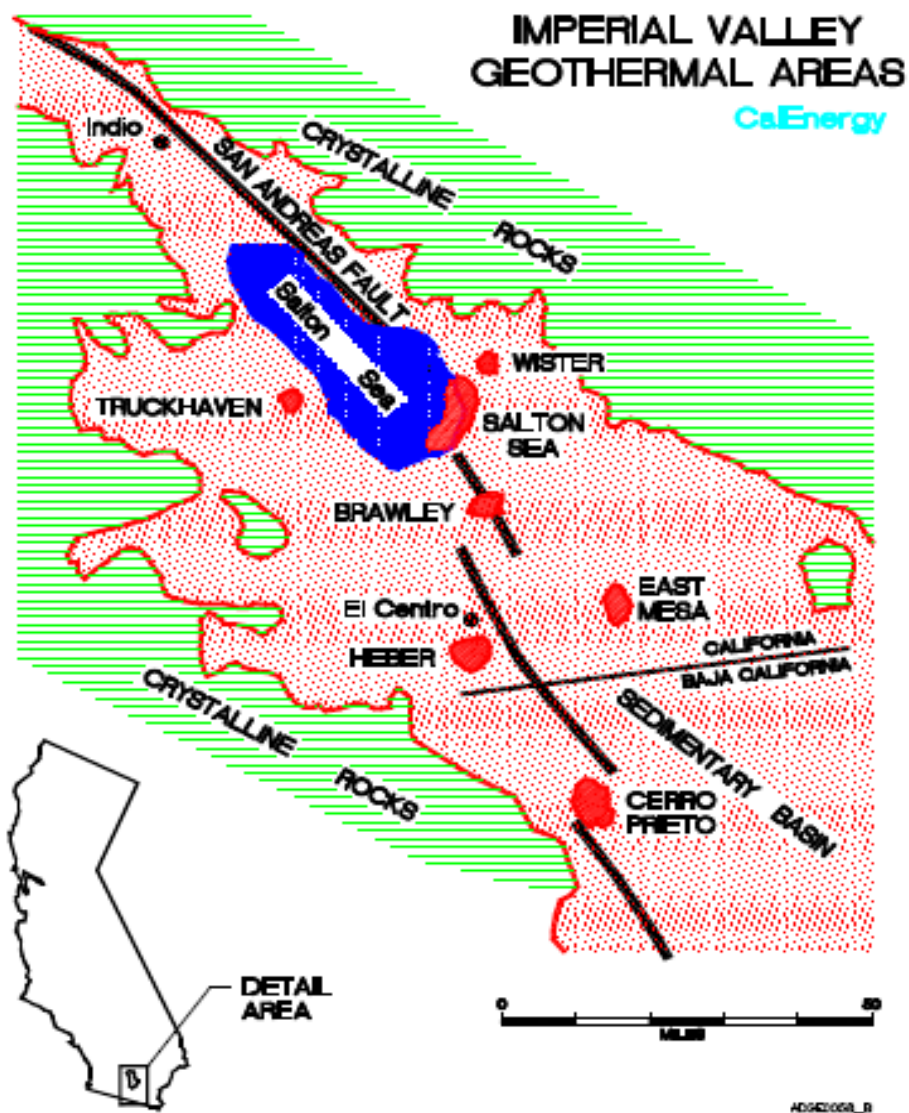


Fig. 1. Ubicación de las plantas geotérmicas en Valle Imperial (CalEnergy, 2005)

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS GEOTERMOELÉCTRICOS EN LA FRONTERA CA-BC

1.2.1. Fallas geológicas

Mexicali

El Valle de Mexicali está ubicado en la frontera entre las placas de Norteamérica y del Pacífico, esta zona se encuentra definida por dos fallas principales, Imperial y Cerro Prieto, sísmicamente muy activas y con deformación concentrada asociada a ellas, así como una zona de sismicidad y deformación dispersas en el centro de dispersión de Cerro Prieto.

La reserva geotérmica de Cerro Prieto se encuentra en su etapa de madurez , la expansión del depósito hacia el Este se encuentra limitado por el Ejido Nuevo León y el Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad local (Aguilar, 2010).

El campo se encuentra a 30 kilómetros al sureste de la Ciudad de Mexicali, capital del estado de Baja California, entre los meridianos $115^{\circ} 12'$ y $115^{\circ} 18'$ de longitud oeste, y es paralelo $32^{\circ} 22'$ y $32^{\circ} 26'$ de latitud norte (Fig. 2 a y b).



Fig. 2a. Ubicación de las plantas geotérmicas de Cerro Prieto, Valle de Mexicali (Aguilar, 2010)



Fig. 2b. Vista aérea CGCP (CFE, 2011)

Valle Imperial

Valle Imperial es parte de una profunda depresión estructural, rellena con sedimentos, se encuentra ubicado en la Frontera de California con México, específicamente en el suroriente del Sur de California, alrededor de El Centro. El Valle limita al este con el Río Colorado y con la Salton Sea al oeste. Al norte están Inland Empire y el Valle Coachella, en la cual juntos, conforman la "Cuenca Cahuilla" o "Salton Trough", también la línea del Condado de Imperial y el Condado de Riverside, y al sur con la frontera internacional entre California y Baja California, México. Fallas mayores y menores cruzan la superficie relativamente plana del Valle, ésta es una de las áreas tectónicamente más activas de los Estados Unidos de América (Lawrence Berkeley Laboratory, 1978).

1.2.2 Profundidad de los pozos

Mexicali

Existen actualmente un total de 369 pozos perforados en el CGCP, de los cuales un promedio anual de 164 se encuentran integrados a los procesos productivos de las diferentes plantas de energía geotérmica de la zona. Los pozos cuentan con profundidades de hasta 4.400 metros.

Existen también 13 pozos de inyección en operación, los cuales regresan al reservorio 19.6 millones de toneladas de salmuera, de un total de 63.0 millones de toneladas. El resto se dispone en una laguna de evaporación solar de 18.6 km² de superficie (Figura 3) (Aguilar, 2010).



Fig. 3. Laguna de evaporación en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CFE, 2011)

Valle Imperial

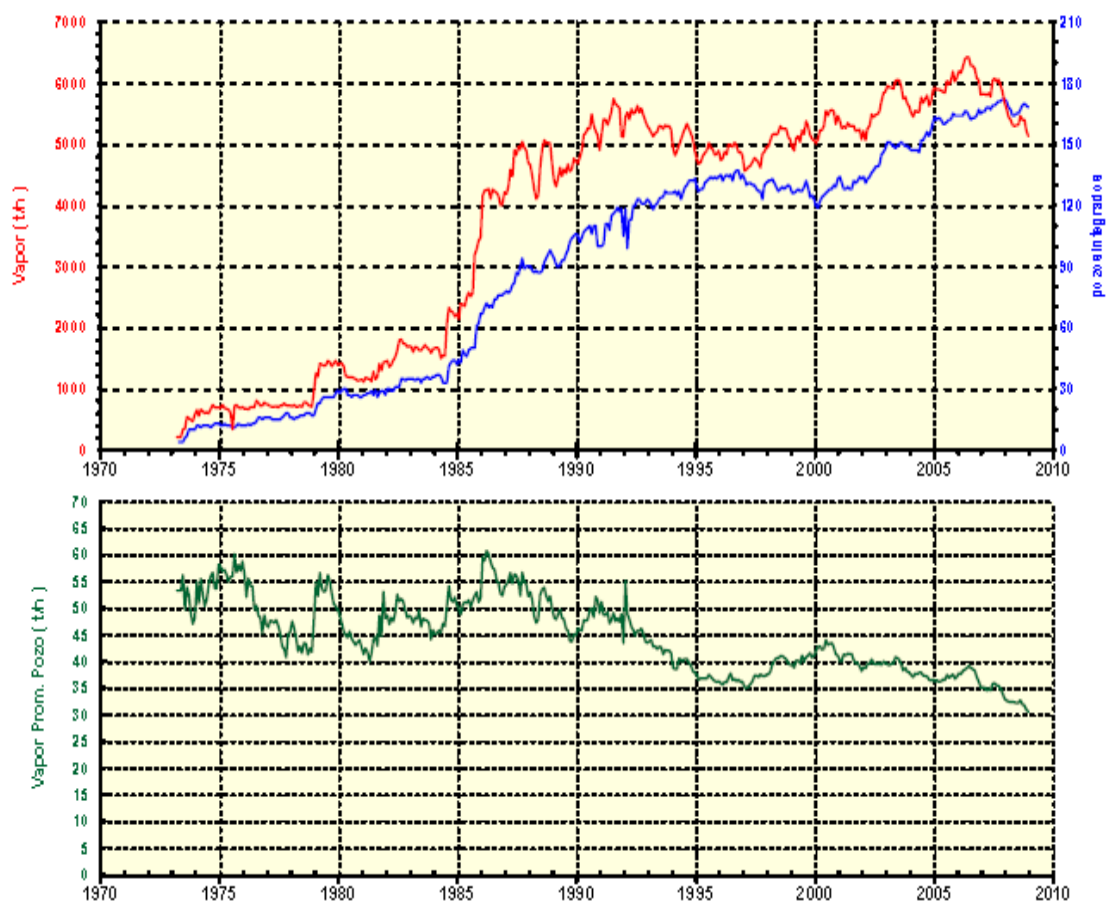
En Valle Imperial los pozos alcanzan hasta 3.000 m de profundidad y prácticamente todos los fluidos geotérmicos se depositan en los pozos de reinyección, lo que se traduce en un menor impacto ambiental, en comparación con Cerro Prieto (Quintero y Sweedler, 2005a).

1.2.3 Extensión del yacimiento

Mexicali

Desde 1973 se han extraído aproximadamente 2.900 millones de toneladas de mezcla binaria (vapor y salmuera caliente) en un área de explotación de 18 km².

En años anteriores cada incremento en el número de pozos significaba mayor producción de vapor, pero actualmente la producción de vapor mantiene una tendencia a la baja debido principalmente a la sobreexplotación a la que está sometido el yacimiento (Gráfica 1) (Aguilar, 2010).



Fuente: (Aguilar, 2010)

Gráfica 1. Tendencia histórica de producción de vapor y número de pozos integrados (arriba) y producción promedio de vapor por pozo (abajo) en CGCP.

Hay dos factores principales que definen la situación actual del CGCP: (i) La declinación del reservorio geotérmico debido a una sobreexplotación, y (ii) un área limitada para la perforación de nuevos pozos.

Considerando los terrenos que recientemente se negociaron mediante contratos de usufructo y el ritmo de perforación actual, queda una superficie suficiente para perforar pozos nuevos hasta el año 2017, con una separación entre pozos de 300 m. Pero después de este año la producción de vapor bajará paulatina e inevitablemente hasta 3600 t/h, que es el pronóstico de equilibrio del depósito (Aguilar, 2010).

Valle Imperial

El inicio de la exploración geotérmica en el Valle Imperial se dio en 1957 al perforar el pozo Sinclair No. 1 en la búsqueda de petróleo-gas, pero en lugar de ello, se llegó a un depósito natural subterráneo muy grande de agua calentada volcánicamente. Más tarde se perforaron más pozos cerca del Mar del Salton, pero debido a la corrosividad de este fluido fue difícil manejarlo en un principio.

En 2005 el Condado de Imperial generaba 535 MW y más de 150 pozos de producción habían sido explotados. El desarrollo geotérmico se extiende a lo largo de un corredor de 35 millas desde Mesa del Este y Heber en el sur del Valle hasta el Mar de Salton en el norte. La oficina de Estudios Geológicos y el Comité de Administración de la Tierra han identificado nueve áreas de recursos geotérmicos conocidos en Valle Imperial (Lund, *et al*, 2005).

1.3 DERECHO Y ADMINISTRACIÓN DE SUELO E INFRAESTRUCTURA

Mexicali

En México todos los campos geotérmicos en explotación son operados y administrados por el gobierno federal a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (Vaca, 2008), la cual está expropiando muchas hectáreas de terreno afectado por la operación de la planta geotérmica de Cerro Prieto, y hasta la fecha continua mostrando a los agricultores afectados el interés en comprar los predios aledaños a la generadora de electricidad a base de vapor (Ortega, 2001).

La CFE continua adquiriendo más hectáreas de los ejidos aledaños a la planta en un esfuerzo por ampliar el CGCP en dirección hacia las comunidades, colocándose a menos de 100 metros, lo cual no debería ser permitido, por la cercanía con las casas habitación, ya que el riesgo será mayor por las emisiones de los gases como el ácido sulfhídrico, el dióxido de carbono, los ruidos y los hundimientos de suelo (Azcárate, 2001).

Valle Imperial

En Valle Imperial la administración de suelo que emplean es diferente al de Cerro Prieto, BC, México, en el sentido de que la tierra pertenece a agricultores privados, es decir, ciudadanos del Condado Imperial, que son los que finalmente deciden si desean o no ceder sus tierras a aquellas personas interesadas en explotar el recurso geotérmico con que cuentan sus propiedades, obviamente la parte interesada tiene que contar con suficiente capital para explotar tal recurso. El

acuerdo básicamente consiste en que la persona interesada tiene el derecho de explotar el recurso durante 30 años, proporcionándole al dueño de las tierras el 0.03% de las ganancias generadas a base de la explotación del recurso y al cabo de ese periodo, debe entregar al propietario, sin algún daño o des nitrificación del suelo, a fin de que si el dueño de esas tierras decide cultivar su terreno, éste pueda ser productivo. De ahí que no existe necesidad de comprar la tierra como es el caso de México.

En lo que se refiere a la infraestructura, éstas pertenecen a compañías privadas, por ejemplo cuatro instalaciones de Valle Imperial (Vulcano, Hoch, Elmore y Leathers) están bajo contrato de venta de energía a *Southern California Edison Company* bajo acuerdos de compra a largo plazo. Otras cuatro unidades - Salton Sea 1, 2, 3 y 4 también venden la energía a *Southern California Edison*. Mientras que la energía de Salton Sea 5 y Turbo CE se vende a la red eléctrica de California (MidAmerican Energy, 2005).

1.4 PROCESO GEOTÉRMICO Y OPERACIÓN COMERCIAL

Mexicali

El proceso geotermoeléctrico en Cerro Prieto, consiste en aprovechar la energía contenida en el yacimiento, para lo cual es necesario efectuar la extracción del fluido geotérmico a través de la perforación de pozos cuya profundidad varía en el orden de los 1200 a 3500 metros de profundidad, posteriormente con ayuda de una turbina llega a la superficie en forma de una mezcla [(salmuera caliente, vapor y gases no condensables (GNC)] de los cuales el vapor mezclado con los GNC se envían a la planta geotérmica para la operación de las turbinas y finalmente la producción de electricidad (Ibarra, 2014).

En el 2008 había 13 unidades de generación de electricidad: cuatro de 110 MWe de double flash, cuatro de single flash de 37,5 MWe (cada una), cuatro de single flash de 25 MWe (cada uno) y uno de 30 MWe de single flash, baja presión, que ascendían a 720 MWe. Estas unidades de energía generaron 5,176 GWh en 2008 con un factor de capacidad anual de 81,8% (0,82) (Gutiérrez, et al, 2010). Posteriormente se presenta una tabla que muestra un resumen de la capacidad instalada en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto en el 2008.

La capacidad de CGCP actual es de 540 MWe puesto que una unidad geotérmica (Cerro Prieto I) de 180 MWe dejó de funcionar recientemente debido a los años de operación del equipo (Tabla 2).

Tabla 2. Utilización de la energía geotérmica para la generación de energía eléctrica en Cerro Prieto datos actualizados hasta el año 2008.

Nombre de la planta de energía	Año en que comienza a operar	N ° de unidades	Status 1)	Tipo de Unidad 2)	Capacidad Total Instalada MWe	Capacidad de operación total anual MWe	Energía total anual producida para el año 2008 GWh/yr 3)	Total Mwe bajo construcción o planeada.
CP-I U-1	1973	1	N	1F	37.5	37.5	0.00	
CP-I U-2	1973	1	N	1F	37.5	37.5	0.00	
CP-I U-3	1979	1	N	1F	37.5	37.5	0.00	
CP-I U-4	1979	1	N	1F	37.5	37.5	0.00	
CP-I U-5	1982	1	N	2F	30.0	30.0	0.00	
CP-II U-1	1986	1		2F	110.0	110.0	942.62	
CP-II U-2	1987	1		2F	110.0	110.0	763.89	
CP-III U-1	1986	1		2F	110.0	110.0	944.40	
CP-III U-2	1987	1		2F	110.0	110.0	863.39	
CP-IV U-1	2000	1		1F	25.0	25.0	207.57	
CP-IV U-2	2000	1		1F	25.0	25.0	217.24	
CP-IV U-3	2000	1		1F	25.0	25.0	233.12	
CP-IV U-4	2000	1		1F	25.0	25.0	235.48	
CP-V	2011	2		1F	0.0	0.0	0.00	100.0

Fuente de datos: CFE, 2008.

Nota:

1) N = No opera, R = Retirado, Blanco = si opera actualmente.

2) 1F = Single Flash, B = Binario (Rankine Cycle), 2F = Doble Flash, O = Otros (Back-presión).

3) Datos actualizados hasta el 31 de diciembre de 2008.

La red de vaporductos del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (Figura 4) tiene una longitud aproximada de 120 kilómetros y posee tuberías de diferentes diámetros (de entre 8" y 46" y están térmicamente aislados con una capa de material a base de lana mineral o fibra de vidrio, con una cubierta exterior de aluminio o hierro galvanizado), ramales, interconexiones entre las distintas áreas del campo con el fin de proporcionar un suministro adecuado a las plantas de generación.

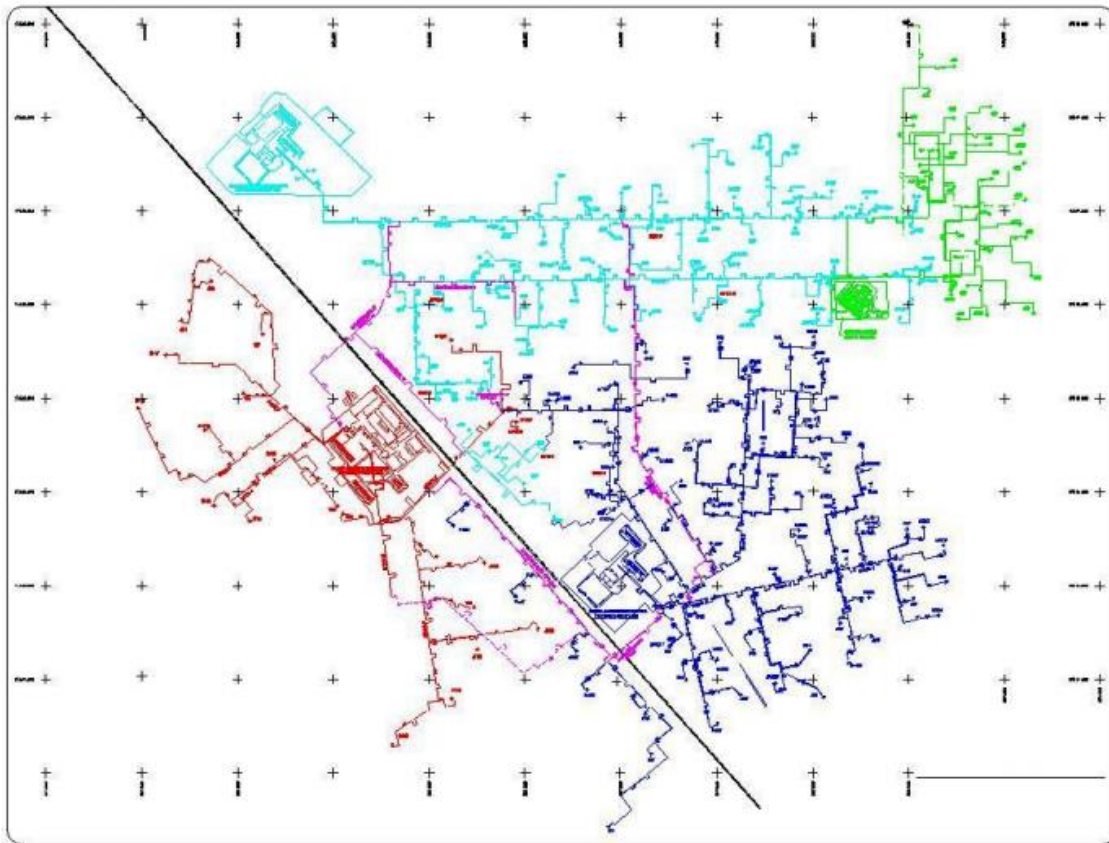


Fig. 4 Red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto
(Fuente: E. Salaices, et al., 2007).

Los ductos colectores del vapor se denominan ramales. Cerro Prieto Uno (CPU) contaba con 8 ramales de alta presión, mientras que para Cerro Prieto Dos (CPD), Cerro Prieto Tres (CPT) y Cerro Prieto Cuatro (CPC) existen ramales paralelos de

alta y baja presión (dos ramales por campo). Esta denominación proviene del tipo de separación: primaria o de alta presión, y separación secundaria o de baja presión. La complejidad y extensión del sistema de vaporductos hace muy difícil el análisis del transporte y suministro de vapor a las plantas generadoras (Salacices, et al., 2007).

La red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C. (CGCP) está compuesta por dos redes paralelas de Alta y Baja Presión debido a que en el campo existe separación primaria y secundaria de vapor, excepto en Cerro Prieto Uno (CPU), el cual ya no presenta actividad.

La red de **Alta Presión** se dividió en dos partes:

- El *Bloque Norte*, formado por los Ramales 1 y 2 de Cerro Prieto Tres (CPT), el campo de Cerro Prieto Cuatro (CPC), los pozos de Cerro Prieto Dos (CPD) que envían vapor a la Interconexión CPD-CPT (Cerro Prieto Dos - Cerro Prieto Tres), y las Interconexiones B y C hacia CPU.
- El *Bloque Sur* formado por los Ramales 1 y 2 de Cerro Prieto Dos (CPD) y el resto de los pozos de Cerro Prieto Uno (CPU).

Por su parte, la red de **Baja Presión** se subdividió en tres bloques:

- El Bloque 1 que incluye 16 pozos de Cerro Prieto Cuatro (CPC) y el Ramal 2 de Cerro Prieto Tres (CPT).
- El Bloque 2 que incluye 17 pozos de Cerro Prieto Cuatro (CPC), el Ramal 1 de Cerro Prieto Tres (CPT) y la Interconexión CPD-CPT, y el Bloque 3 que incluye 44 pozos de Cerro Prieto Dos (CPD).

Las diferencias relativas promedio de las presiones y flujos medidos y simulados son menores para la red de Alta Presión que para la red de Baja Presión.

Para el Bloque Norte de la red de Alta Presión, la diferencia relativa promedio entre presiones medidas y simuladas de los pozos varía entre -3.8% y +6.6%, con valores medios de 1.2 a 4.3%, mientras que para los puntos de entrega-recepción de vapor en las plantas las diferencias entre presiones y gastos medidos y simulados son menores de 5.2% y 1%, respectivamente, y la calidad es mayor de 98.5%. Para el Bloque Sur de la red de Alta Presión, la diferencia relativa promedio entre presiones medidas y simuladas de los pozos varía entre -8.2% y +4.2%, con valores medios de -3.7 a 2.3%, mientras que para los puntos de entrega-recepción de vapor en las plantas las diferencias entre presiones y gastos medidos y simulados son menores de $\pm 6.4\%$ y $\pm 9.0\%$, respectivamente, y la calidad es mayor de 96.5%. Para la red de Baja Presión, las diferencias relativas promedio son de 21.2% para el Bloque 1, y de 8.0% y -2.8% para los Bloques 2 y 3, si se consideran las válvulas de la Interconexión CPD-CPT Sur y del Ramal 1 de CPT al Ramal 2 de CPC totalmente cerradas. La simulación de diversos escenarios con el flujo de vapor de la Interconexión CPD-CPT Sur hacia el Ramal 1 de CPT y al Ramal 2 de CPD, y con ajustes de las presiones de llegada a las plantas, indican que las diferencias relativas entre presiones medidas y simuladas pueden alcanzar valores de -1.6% a +8.0%, mientras que las diferencias entre gastos medidos y simulados a la llegada de plantas son de -8.3% a +28.2%, en promedio, y la calidad del vapor es mayor de 96%.

Debido a una capacidad instalada decreciente en el campo geotérmico de Cerro Prieto tras el cierre de Cerro Prieto Uno (CPU), de 720 a 540 MW, se desarrolló la porción Noreste (NE) del campo, denominada sector CP IV, donde se perforaron catorce nuevos pozos desde el 2000 a la fecha.

El sector CP IV se localiza en la porción NE del campo geotérmico Cerro Prieto. Los pozos de esta zona producen fluidos bifásicos, con diferentes características en cuanto a su contenido de fracción de vapor:

- En la parte central y hacia el NW los fluidos son de tipo líquido dominante.
- En el E y hacia el S, el fluido contiene una fracción relativamente alta de vapor.

En 2005 se realizó un proyecto conjunto IIE-CFE (Instituto de Investigaciones Eléctricas – Comisión Federal de Electricidad), en el que se realizaron estudios detallados del sector CP IV (Portugal, et al., 2006), con el objeto de estimar las características del yacimiento en su estado natural y también investigar los cambios ocurridos debido a la explotación.

Los resultados del estudio mediante equilibrio gaseoso FT-HSH3 mostraron que los fluidos en el yacimiento se encuentran a temperaturas de entre 275°C y 310°C. Los datos hallados para el estado natural sugieren que los pozos reciben diferentes proporciones de vapor pre-existente en el yacimiento, que se mezclan con fase líquida para producir las descargas que se observan. Los datos actuales, además de mostrar la presencia de vapor de yacimiento, también indican la entrada de fluidos de menor temperatura en la parte central del sector CPC (Cerro Prieto Cuatro).

La composición química de los fluidos descargados por los pozos muestra características uniformes, aunque existen efectos de dilución en algunos pozos y diferencias en valores de pH (entre 5 y 8). La dilución se atribuye a la presencia de condensado en los pozos, en donde ocurre el fenómeno de ebullición de manera

importante, así como a la entrada de fluidos más someros, menos salinos y de menor temperatura en pozos localizados en el centro del sector CPC (Portugal, et al., 2006).

Por medio de un estudio de la fase líquida producida, se encontró que la mayoría de los fluidos se encuentran en equilibrio total, respecto a su composición relativa de Na-K-Mg. También se observaron variaciones en las características químicas de los fluidos de algunos pozos con el tiempo dependiendo de las condiciones de producción de los mismos.

El estudio de la fase gaseosa producida es importante para estimar parámetros de yacimiento debido a la existencia de pozos de alta entalpía en CPC (hacia el E), con producción de fluidos bifásicos de alta fracción de vapor. Para realizar la estimación de la temperatura y de la fracción de vapor de yacimiento presentes en las descargas de los pozos se utilizó el método de equilibrio gaseoso FT-HSH3 (Siega, et al, 1999; Barragán, et al, 2006).

El método FT-HSH3 considera el equilibrio gaseoso de la reacción de Fischer-Tropsch (FT) ($\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$) junto con el equilibrio combinado pirita-pirrotita (HSH3) ($\text{FeS}_2 + \text{H}_2 = \text{FeS} + \text{H}_2\text{S}$). Este buffer mineral (pirita-pirrotita) parece ser el que controla la concentración de H_2S en los fluidos de CPC. La presencia de los minerales considerados en muestras de pozos de CPC, así como la concordancia de resultados de temperatura de yacimiento obtenidos por este método y por geotermometría de fase líquida, proporcionan bases suficientes para el uso del método FT-HSH3 en este sector del campo. Para utilizar este método de equilibrio, se calculan los parámetros FT y HSH3 a partir de la composición

química de las muestras gaseosas para estimar la temperatura de yacimiento y la fracción de vapor.

Los resultados del estudio apuntan que los fluidos que alimentan a los pozos de CPC, son diferentes en lo que respecta a su temperatura y fracción de vapor de yacimiento. Lo que sugiere que los pozos producen una mezcla en diferentes proporciones de dos componentes principales. Uno de ellos está constituido de fase líquida, a una temperatura de aproximadamente 310°C que se caracteriza por el fluido producido por el pozo 426, mientras que el otro fluido tiene una fracción de vapor de ~0.5 y una temperatura de aproximadamente 275°C. Este fluido lo produce el pozo NL-1. En base a lo anterior se puede deducir que la presencia de fase vapor en el sector CPC, puede originarse por la ebullición del líquido profundo. Entonces es probable que en el yacimiento exista segregación de fases y que exista flujo preferencial de vapor hacia los pozos, produciendo valores altos de fracciones de vapor. En estudios previos de fase gaseosa realizados en la zona CPU del campo geotérmico Cerro Prieto, se evidenció la presencia de vapor y otros resultados basados en la composición isotópica de fluidos de CPD y CPT han indicado la mezcla de fluidos del yacimiento con vapor preexistente en el mismo (Stallard, et al., 1987).

En cuanto al uso dentro de la planta, esto es cubierto principalmente por los servicios públicos del terreno: pozos de producción de vapor, instalaciones de producción de energía, las oficinas administrativas, la laguna de evaporación, tuberías de vapor y carreteras. Fuera de la planta el uso de la tierra era para fines agrícolas y asentamientos pero debido a la pérdida de fertilidad del suelo en la zona, ya no se utiliza para cualquier propósito (Quintero, *et al.*, 1993).

Valle Imperial

En el Condado de Imperial se cuenta con más de un proceso para producir electricidad (Tabla 3):

- ❖ Ciclo Binario. Recursos de baja entalpía (100 a 160° C).

En este ciclo el fluido geotérmico viaja a través del intercambiador de calor, allí se evapora un fluido secundario de bajo punto de ebullición (cloro fluoro carbonado, amoniaco o isobutano), que impulsa una turbina y es condensado y reciclado dentro de un sistema cerrado. Ese tipo de unidades son usadas en la mayoría de los casos para la producción de energía eléctrica, - utilizando recursos con baja y media temperatura. Un parámetro para seleccionar el fluido secundario es la temperatura de funcionamiento (aproximadamente 90°C).

Ese tipo de unidades tiene alto costo por unidad de capacidad instalada en comparación con las de condensación convencional pero en muchos casos son la alternativa más adecuada para el desarrollo geotérmico.

Se puede obtener una alta eficiencia especialmente cuando el contenido de gas del fluido es alto, en tal caso las plantas binarias pueden llegar a ser más económicas que las unidades de condensación convencional (que tengan incorporado equipo para extracción de gas), para un fluido de entalpía media las plantas binarias generalmente son la alternativa más económica sin preocuparse por el contenido de gas. Las unidades con ciclo binario proveen un alto grado de flexibilidad y permiten optimizar el recurso geotérmico por medio de la combinación de sistemas en cascada (UPME, 2003).

Tabla 3. Operación Comercial en Valle Imperial

Dueño	Planta	Tipo	Año	Número de unidades	Valoración MW	factor de capacidad %	Energía Anual GWh
EAST MESA							
ORMAT	GEM 1	B	1979	1	R		
	2	2F	1989	1	18.5	92.5	146
	3	2F	1989	1	18.5	92.5	146
ORMAT	ORMESA 1	B	1987	26	20	90.0	158
	II	B	1987	20	20	90.0	158
	IE	B	1988	10	10	90.0	79
	IH	B	1989	12	12	90.0	95
Sub-totales				71	99		782
HEBER							
SDG&E (dado de baja)	Binario Demo.	B	1985	1	R		
ORMAT	Dual-flash	2F	1985	1	52	90.0	410
ORMAT	Segundo proyecto imperial	B	1993	12	48	80.0	231
Sub-total				14	100		641
MAR SALTON							
CALENERGY	S.S1	1F	1982	1	10	104.0	91
	S.S.2	2F	1990	3	20	104.0	182
	S.S.3	2F	1989	1	50	104.0	455
	Vulcan	2F	1985	2	38	104.0	346
	Hoch	2F	1989	1	42	104.0	383
	J.J Elmore	2F	1989	1	38	104.0	346
	J.M Leathers	2F	1989	1	38	104.0	346
	S.S 4	2F	1996	1	40	104.0	403
	S.S 5	2F	2000	1	50	104.0	503
	CE Turbo	1F	2000	1	10	104.0	91
Sub-total				13	336		3146
TOTAL				98	535		4569

- ❖ Ciclo Flash y Double Flash. Fluidos hidrotermales arriba de 360°F (182 ° C) se pueden utilizar en las plantas de tipo flash para hacer electricidad.

El líquido se lleva en un tanque a una presión mucho más baja de la que originalmente presenta, causando que parte del líquido logre vaporizar rápidamente ("flash"). El vapor se conduce a continuación a una turbina, que acciona un generador. Si queda líquido en el tanque, se puede dirigir de nuevo en un segundo tanque (double flash) para extraer aún más energía (The California Energy Commission, 2013).

Sin embargo un ciclo doble no es siempre recomendado por dos razones:

- Debido a que la temperatura final del agua separada (alrededor de 120° C) generalmente incrementa las incrustaciones en los pozos de reinyección.
- Porque el costo del equipo no necesariamente da como resultado un incremento en la producción de energía, que compense la inversión adicional, especialmente cuando el contenido del agua en un fluido geotérmico decrece con el tiempo, como ocurre a menudo en reservas de alta entalpía (UPME, 2003).

Actualmente la capacidad geotérmica instalada en el Condado de Imperial es de 704 MWe (Heber: 120,5 MWe; Hotville: 121 MWe; Brawley: 49,9 MWe; Calipatria: 412 MWe) (Ramírez, 2014).



2. IMPACTO AMBIENTAL

2.1 LOS CONTAMINANTES QUÍMICOS Y SUS EFECTOS

Además de la generación de energía eléctrica, las plantas geotérmicas también generan subproductos que afectan al medio ambiente (aire, suelo y agua) y a la salud de los pobladores, ejemplo de ello son los gases no condensables (GNC) (el CO₂, el H₂S, el NH₃) y la salmuera residual (Gallegos *et al*, 1997). En estudios recientes se han registrado emisiones potenciales de benceno, amonio, metano, dióxido de azufre (SO₂), NOx y contaminantes traza peligrosos (HAPs) incluyendo: tolueno, xileno, etilbenceno, Rn-222 y metales pesados como As, Hg, Pb y Zn (CalEnergy Operating Corporation, 2008).

Mexicali

La Central Geotermoeléctrica de Cerro Prieto de la CFE –la segunda más importante en el ámbito internacional-, contamina los suelos debido a la cantidad de sal que se acumula en los terrenos aledaños y dado que se extiende cada vez más, ha provocado que los terrenos ubicados en el ejido Nuevo León, que hace tiempo tenían una tierra muy fértil donde se sembraban hortalizas, se han convertido en yermos por la salinidad que queda como residuo de la emanación del gas endógeno que sale de las plantas de la CFE (García, 2011), el cual contiene litio, cadmio, arsénico, ácido sulfúrico, amoníaco y boro, los que además

del suelo contaminan el aire y por lo tanto generan graves problemas a la salud pública (Rosas, 2005).

Se calcula que las operaciones del campo geotérmico producen cerca de 6,400 toneladas por hora de salmuera residual, del cual un 88% de todas las aguas residuales (Tabla 4) se envían a una laguna de evaporación (Figura 5) que cubre un área de 7.2 millas cuadradas (18.6 kilómetros cuadrados) generando con ello la contaminación del suelo y del acuífero superficial de la región (Ramírez y García, 2004), al deteriorar la calidad química de éste último, especialmente por la adición de metales y de minerales no metales como el arsénico.

El proceso de reinyección sólo se realiza al 30% de la salmuera residual con altas concentraciones de cloruros y de sílice (dióxido de silicio) (Gutiérrez y Ribo, 1994), se lleva a cabo por gravedad utilizando varios pozos muertos (Muñoz et al., 2012).

La solubilidad del dióxido de silicio puede variar con cambios en la temperatura (Elders *et al*, 1984; Lippmann *et al*, 1997) y, como resultado, se puede precipitar sílice (costras o incrustaciones que disminuyen la velocidad de transporte del fluido) dentro de las fracturas, reduciendo tanto la porosidad como la permeabilidad de la formación (Lippmann *et al*, 1997) y como consecuencia, se genera un cambio en las propiedades elásticas de los materiales haciéndolos más frágiles, lo que motiva que la profundidad de la interface dúctil- frágil cambie, así como la zona sismogénica (Suárez, *et al*, 2001).



Fig. 5 *Deposición del agua residual en CGCP (Fuente: Propia)*

La contaminación del acuífero superficial ha ido incrementando con el paso de los años debido principalmente a la salinidad causada por los fluidos geotérmicos con alto contenido de sal de 60.000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos totales (TDS), que emergen de profundidades de 2000 m o más.

Desde el comienzo de la operación CGCP, la salmuera residual se deposita artificialmente en la laguna de evaporación; ésta área era parte de un acuífero

superficial y se convirtió en la zona de descarga geotérmica con numerosas manifestaciones hidrotermales superficiales (Ramírez y García, 2004).

Cuando el agua residual generada se inyecta nuevamente al reservorio, se presenta uno de los problemas principales de la inyección, debido que esta agua residual presenta alto contenido de sílice en las aguas geotérmicas residuales que pueden precipitar. Esta precipitación de sílice no ocurre dentro del sistema de acarreo superficial, pero sí dentro del reservorio debido a la dilatación de la inducción o tiempo de la polimerización de la sílice para la temperatura de inyección (175° C).

Varios autores han modelado los procesos de polimerización y precipitación de sílice en medios porosos. Sin embargo, el problema de polimerización y deposición de sílice en los medios fracturados es probablemente más complejo. El período de tiempo antes que la sílice comience a polimerizarse se denomina tiempo de inducción y para una temperatura dada disminuye con la supersaturación.

El problema de deposición de sílice dentro de los pozos inyectoros involucra varios pasos:

1. Durante el rápido enfriamiento en los sistemas de separación agua-vapor, la conducción por el sistema de acarreo superficial, el paso por el pozo inyector y finalmente en el reservorio, la precipitación no ocurre porque el tiempo de inducción de la polimerización aún no ha terminado.
2. En el reservorio, el agua viaja una corta distancia antes de que la sílice empiece a precipitarse. La distancia recorrida depende de la velocidad del

agua en el reservorio y del tiempo de la inducción, después de iniciado el viaje a lo largo del sistema de acarreo.

3. El fluido se mueve y precipita la sílice hasta que se alcanza la saturación con respecto a la solubilidad del mineral de sílice. El tiempo necesario para precipitar y alcanzar la saturación, así como información acerca de la velocidad del agua dentro del reservorio, puede ser utilizado para estimar la distancia viajada durante esta travesía.
4. La disminución en la porosidad respecto al tiempo para el área afectada puede encontrarse si se conoce la masa y el volumen de sílice precipitada por unidad de masa de fluido reinyectado.

Otro factor que debe considerarse es que las lagunas donde se deposita la salmuera no están recubiertas de cemento y dado que el contenido de salmuera tiene altas cantidades de sílice, al mezclarse se une con el oxígeno, formando un óxido de sílice que es como un polvo cementante y pesado que cae a la base de las lagunas impidiendo cualquier infiltración vertical, permitiendo únicamente flujo hacia los lados que es lo que afecta a los terrenos y ejidos aledaños (Reyes, *et al*, 2010) causando incrustaciones e infertilidad en los suelos para uso agrícola o pecuario (Muñoz, *et al*, 2012).

Tabla 4. Composición química de aguas geotérmicas de Cerro Prieto

Compuesto	Cantidad mg/l
Na ⁺	7350
K ⁺	1520
Ca ²⁺	528
B ⁻	174
Si ₂ O	650
HCO ₃ ⁻	11
Cl ⁻	14200

Fuente: Hiriart y Del Río, 1995

La composición química se basa en los valores promedio de los pozos.

El tipo agua se clasifica como clorurada sódica.

Pero la contaminación no se debe únicamente a la salmuera residual, ya que durante el proceso de generación de energía eléctrica (Tabla 5), se emite, junto con el vapor, partículas y una serie de gases incondensables, principalmente dióxido de carbono, ácido sulfhídrico [el cual llega a ser venenoso si se encuentra en alta concentración (Albertsson, *et al.*, 2010)], amoníaco, metano, propano, y anhídrido sulfuroso. Resaltando el hecho de que tanto el ácido sulfhídrico como el anhídrido sulfuroso, son los gases que ocasionan mayor deterioro ambiental y daños en la salud humana (Rosas, 2005), aunque no se puede precisar cuánto afecta a la gente que está obligada a respirar elementos nocivos que acompañan a la exhalación que sale del subsuelo (García, 2011), la comunidad asocia esta contaminación con enfermedades y males detectados en la región del Valle de Mexicali: alergias, asma, sordera, pérdida del olfato, dolores intensos de cabeza,

problemas crónicos bronquiales, entre otras aunque a la fecha no se ha probado esto a nivel científico técnico (Rosas, 2005).

Tabla 5. Composición típica del efluente de caldera de una unidad de 250 MW

Compuesto	Cantidad
Sólidos suspendidos	166 mg/l
pH	8.9
Sólidos disueltos totales	100 mg/l
Grasas y Aceites	0.2 mg/l
Silica	0.2 mg/l como Si ₂ O
Temperatura	> 10 C

Fuente: Shandilya *et al*, 2006

En el 2000, la Comisión Federal de Electricidad reportó la emisión de 641 mil 500 toneladas de bióxido de carbono y de 22 mil 742 toneladas de ácido sulfhídrico al aire de Mexicali.

Se puede aseverar que debido a la explotación no sustentable que se ha hecho del recurso geotérmico, el problema de impacto ambiental se ha acelerado intensamente (Padget, 2009). La ausencia de normas que controlen el enorme volumen de gases emitidos a la atmósfera ha afectado el suelo, aire y agua. En lo que respecta al suelo, se encuentra absolutamente deteriorado, al menos en la capa fértil de dos metros de profundidad, las condiciones físicas y químicas que presentan impiden cualquier aprovechamiento agropecuario. En la zona, la Comisión Federal de Electricidad desapareció totalmente la agricultura, no hay ninguna actividad de ningún tipo en esa zona, porque los suelos están sumamente afectados.

Valle Imperial

Debido a la diferencia en las mejores prácticas, las plantas geotérmicas en Valle Imperial representan un menor impacto ambiental en comparación con Cerro Prieto (Reyes, 2010), puesto que en Valle Imperial prácticamente los fluidos geotérmicos en su totalidad son reinyectados, evitando así los efectos que surgen al evaporarse tanto los gases como la salmuera residual geotérmica a la atmósfera. Inclusive en algunas plantas geotermoeléctricas los sólidos que se separan, cuando la concentración del fluido geotérmico es demasiado alta, se utilizan para rellenar el terraplén del Mar de Salton como refuerzo en caso de temblores fuertes los cuales son bastante comunes en esta área (Quintero y Sweedler, 2005a).

Otro aspecto importante es el control estricto de los subproductos geotérmicos en Valle Imperial (Tabla 6), el cual permite que la explotación geotérmica sea considerada como un recurso seguro para el ambiente, ya que la explotación del recurso es moderado y no sobreexplotado como sucede en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Cuando las plantas geotermicas incurren en el desapego de las normas especificadas de los reglamentos estatales y federales, se aplican sanciones, por ejemplo en el año 2000 la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency) multó al Distrito de riego del Valle Imperial (IID, por sus siglas en inglés) por no cumplir con las normas de calidad de aire (Simon, 2000), ya que las plantas de ciclos combinados que utilizan gas natural como combustible descargaban sus subproductos al ambiente, que consisten mayormente de NOx.

La siguiente tabla muestra los límites de emisión que no deben exceder las unidades 1, 2, 3, 4 y 5 de Cal Energy Region 1.

Tabla 6. Límites de emisión de contaminantes de las unidades 1, 2, 3, 4 y 5 de la Región 1 de Valle Imperial.

Contaminante	Unidades 1 y 2		Unidades 3 y 4		Unidad 5	
	Límites de emisión (lb/hr)	Límites de emisión (lb/día)	Límites de emisión (lb/hr)	Límites de emisión (lb/día)	Límites de emisión (lb/hr)	Límites de emisión (lb/día)
H ₂ S	8.4	202	12.4	297.6	2.0	48.0
Benceno	0.12	2.9	0.19	4.56	—	—
SO ₂	3.55	85.2	3.6	86.4	—	—
NO _x	1.0	24.0	0.91	22.0	—	—
PM ₁₀	0.50	12.0	0.50	12.0	—	—

Fuente: AIR POLLUTION CONTROL DISTRICT, 2009.

2.2 IMPACTOS SOBRE EL MEDIO FÍSICO

La exploración, desarrollo y utilización de una zona geotérmica puede tener un impacto significativo en el medio ambiente físico que rodea al recurso. Durante las etapas iniciales de exploración, el impacto es leve, debido principalmente a la construcción de vías de acceso para las mediciones geoquímicas y geofísicas. Ahora bien, si se toma la decisión de pasar de la exploración a la perforación, entonces las consecuencias para el medio ambiente físico se vuelven más obvias, ya que las vías de acceso y plataformas de perforación deben ser construidas, lo cual genera problemas para el paisaje, así como la generación de ruido, que se emite a partir de las operaciones de perforación. A medida que avanza el desarrollo, el efecto sobre el paisaje alcanza un máximo cuando se requiere más tierra para posteriores perforaciones, rutas de ductos y de la estación de energía. También durante la fase de construcción se da un aumento de contaminación acústica y las características geotérmicas naturales pueden disminuir o aumentar la actividad, el clima local puede verse afectado, grandes volúmenes de agua de

refrigeración pueden contribuir a la contaminación térmica de las vías fluviales locales y algunas zonas de la tierra pueden ser susceptibles al hundimiento (Brown, 2000).

Mexicali

La extracción comercial de fluidos geotérmicos en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) se inició desde 1973, y desde 1989 empezó la inyección de salmuera, ocasionando deformaciones de la zona. Las deformaciones y la sismicidad en el Valle de Mexicali son influidas por tectonismo activo, vulcanismo, procesos hidrotermales y actividad humana. Para estudiar la distribución espacial y temporal de las deformaciones, durante los años de 1996 a 2004 se instalaron en el valle y en los terrenos del CGCP dos grietómetros verticales, uno horizontal, dos inclinómetros de pozo, seis inclinómetros bidimensionales de superficie y un termómetro digital de pozo, todos con registro semi-continuo, y se construyó un testigo de 3D. Esta red es complementada por una red de siete piezómetros digitales, con registro semi-continuo, instalados en los pozos del acuífero somero (E. Glowacka, et al., 2006).

La principal razón de los problemas presentes en CGCP obedece al hecho de que no existe una normatividad que regule la explotación de los pozos, la CFE realiza una sobreexplotación del acuífero, ya que es mayor el volumen de vapor extraído que el agua que se filtra en el subsuelo, lo que significa un alto riesgo que podría llegar a colapsar la superficie (García, 2011). Además se sabe que la tecnología que se está utilizando en Cerro Prieto es obsoleta e ineficiente y que las condiciones geohidrológicas de la zona están afectadas terriblemente ya que las 14,000 toneladas de vapor que sacan por hora, representa muchísimo más del agua que se recarga para alimentar ese vapor, por lo que existe un desequilibrio geo-hidrológico en la zona que ha provocado una pequeña elevación local y subsidencia (Reyes, et al, 2010), alcanzando una tasa de 18 cm/año y afectando a

la infraestructura de carreteras, vías de tren, canales de irrigación y suelos de los ejidos cercanos (Sarychikhina, *et al*, 2011). Esto se debe principalmente a la profunda fractura natural, cruzando el campo (sistema de falla de San Andrés), la cual ha dado paso a la reserva subterránea geotérmica. Un hundimiento máximo de 62 mm durante el período 1977-1979 para el campo geotérmico de Cerro Prieto (Mercado et al., 1988).

Otro impacto sobre el medio físico que resulta interesante es el ruido tan alto que proviene de las turbinas generadoras y las válvulas de seguridad de los pozos, mismo que afecta a los pobladores vecinos de la zona, a quienes con el paso de los años ese ruido tan elevado les genera sordera (Padget, 2009).

Valle Imperial

Es bien conocido que la extracción en los campos geotérmicos está frecuentemente acompañada por subsidencia o hundimiento, que alcanza docenas de centímetros por año (García, 2011). Sin embargo en Valle Imperial esto no representa un problema alarmante, ya que el sistema que emplean es más sofisticado, además de que cuentan con normas, las cuales regulan el proceso y ayudan a mitigar dicho impacto.

En las plantas geotérmicas de Valle Imperial se han tomado medidas muy prácticas para disminuir el ruido proveniente del proceso geotérmico, al implementar silenciadores a las turbinas generadoras, por lo tanto no existe un problema tan marcado como en el Valle de Mexicali, puesto que las perturbaciones se atenúan. Por otra parte, en el Valle Imperial, las plantas geotérmicas están aisladas de los pueblos más cercanos, por lo que no hay asentamientos que se encuentren en las proximidades.

2.3 NORMATIVIDAD

Mexicali

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la institución del Gobierno Federal encargada de regular los asuntos de medio ambiente. La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) es la oficina encargada de los asuntos legales del orden del medio ambiente, mientras que el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) es un órgano de investigación; ambos son organismos descentralizados. En México, los reglamentos estatales y locales del medio ambiente se derivan de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) (Chacare et al, 2006). Por otra parte, la SEMARNAT es el organismo encargado de la regulación y vigilancia de los efectos ambientales de las empresas de energía (ya sea privada o pública, como CFE). Por desgracia, (estatal y municipal) las agencias ambientales locales no interactúan con el CGCP, dando lugar a tiempos largos para resolver los problemas.

A principios del año 2005, tanto Profepa como Semarnat entregaron a la CFE la certificación de Industria Limpia por cumplir con las normas oficiales de ISO 1400 y Empresa Limpia (Rosas, 2005). Sin embargo la Profepa emitió de manera muy discreta su propia evaluación ambiental que corrobora el hecho de que la contaminación de Cerro Prieto resultante de los productos químicos y metales tóxicos representa un peligro para la salud. En el oficio PFBA-DBC-UDQ/MX/652/2005, fechado el 15 de diciembre, reconoce que la planta de la CFE infringe las regulaciones ambientales federales. Cabe mencionar que dicho oficio aún se encuentra reservado, lo cual es un indicio de que la salud de cientos de mexicalenses se encuentra en riesgo potencial. Profepa todavía no divulga los resultados de sus hallazgos, de las actas de inspección número PFPADBC-UDQ-I

/MX /070 /2004 y de la PFPA -DBC -UDQ -I /MX /071 /2004, realizadas a la Residencia General del Cerro Prieto y otra a la Central Geotermoeléctrica de la CFE, las cuales se efectuaron entre el 9 y el 12 de agosto del 2004 mismas que bien servirían de base para dictaminar contra la planta y denunciar penalmente el asunto ante la Procuraduría General de la República, pues se trata de delitos del orden federal. Otra cuestión interesante es que no pueden medir el ácido sulfhídrico en el aire, debido a que la PROFEPA no ha instalado los dispositivos para poder monitorear la calidad del aire en Mexicali, a pesar de ser este factor contaminante un tema de corte binacional que se encuentra dentro de la franja convenida y, por tanto, debería estar incluido en el Programa Frontera 2012, como cualquier fuente de contaminación de agua, suelo, aire, pero mientras no afecta a Estados Unidos, no forma parte de la agenda de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), ni de Semarnat de México (Rosas, 2005).

Valle Imperial

En los EEUU la EPA ha delegado la autoridad de expedir permisos al Distrito de Control de Contaminación Atmosférica del Condado Imperial (ICAPCD por sus siglas en inglés) y al distrito de Control de Contaminación Atmosférica del Condado de San Diego (SDAPCD). Los permisos incluyen las condiciones para ejecutar y aplicar los requisitos federales y están sujetos a la supervisión de la EPA de EU y, posiblemente, a tribunales federales (KEMA Inc., 2009). En términos más específicos, las entidades más importantes que se ocupan de cuestiones relacionadas con la calidad del aire en el Valle Imperial son: el Distrito de Control de la Contaminación del Aire del Condado Imperial (ICAPCD, por sus siglas en inglés), el Buró de los Recursos del Aire del Estado de California (CARB, por sus siglas en inglés), y a nivel federal, la EPA (Ramos, 2011). En Estados Unidos, las regulaciones ambientales se derivan de la Ley Nacional de Política Ambiental , y

en el caso de California, de la Ley de Calidad Ambiental y el condado de Normatividad (Chacare et al., 2006).

El ICAPCD es responsable de aplicar y supervisar en el ámbito local todas las normas y regulaciones federales y estatales correspondientes a la calidad del aire. A su vez, ha establecido una serie de regulaciones y reglas de carácter obligatorio para las entidades públicas y privadas que pretendan desarrollar acciones dentro del área jurisdiccional del condado Imperial. Tales regulaciones y reglas tienen que ver con los siguientes aspectos: trámite de permisos de construcción, permisos de operación de fuentes de contaminación atmosférica, implementación de planes para el control de la contaminación del aire, renovación de licencias de operación, implementación de créditos para la reducción de emisiones, control de solventes orgánicos, operación de incineradores y crematorios, rellenos sanitarios municipales, control de quema agrícola y control de polvos fugitivos, entre los más importantes. Como se puede apreciar, la administración ambiental en el estado de California, y especialmente en el condado de Imperial, representa oportunidades y retos para promover un enfoque local de gestión ambiental del aire en los municipios fronterizos mexicanos. Esto se puede plantear porque en el caso del estado de California existe un modelo de gestión estratégica ambiental fundamentado en una visión, normatividad, estrategia, consensos, planeación y evaluación, entre otros elementos de gestión. En consecuencia, es difícil que las industrias incumplan tal gestión y normatividad, por lo cual tienden a instalarse en regiones en donde los controles ambientales son más flexibles o no existen (Ramos 2011).

2.4 IMPACTO ECONÓMICO

Los impactos sociales y económicos son consideraciones importantes al evaluar el impacto global del desarrollo geotérmico. En muchos aspectos, los impactos socio-económicos de un desarrollo particular, están íntimamente relacionados con los posibles impactos bio-físicos y, en consecuencia, es importante que las evaluaciones ambientales de las propuestas de desarrollo geotérmico tome en cuenta todos estos temas juntos (Brown, 2000).

Mexicali

Cerro Prieto es la zona geotérmica más explorada, explotada, y en consecuencia la zona geotérmica más productiva que ofrece la más alta inversión en México (Padget, 2009). Baja California ha experimentado un aumento en la cartera de energía, y en la actualidad, la electricidad se produce sobre la base de los recursos geotérmicos, gas natural, gas combustible, solar y eólica. Cuando existe un excedente de energía eléctrica, en el estado de Baja California, que por lo regular se presenta en otoño e invierno y hay un pedimento de los EEUU (Ibarra, 2014), existe la posibilidad de exportar la energía eléctrica bajo convenios muy específicos con compañías eléctricas norteamericanas. Pasa lo mismo en sentido contrario, cuando hay un requerimiento de mayor uso de energía eléctrica en Mexicali, sobretodo en el periodo de verano caracterizado por temperaturas extremas, eventualmente se importa energía desde California. De esa manera se evita el uso de las plantas eléctricas de emergencia o pico como las turbo gaseras que operan con diesel. La planta de Cerro Prieto de energía es una sólida fuente de empleo, ya que actualmente emplea a más de 500 trabajadores.

Valle Imperial

La industria geotérmica es responsable del 25% del impuesto de propiedad base (property tap base) en el desarrollo de Valle Imperial. Esto representa más de \$1.2 mil millones de dólares en evaluación asesorada, y es que los 535 MW producidos en el Valle son suficientes para suministrar energía eléctrica a 400,000 consumidores. La energía eléctrica producida aquí es la energía equivalente a 4×10^6 barriles de petróleo por año, que si fuera importado costaría por arriba de 80 millones de dólares (Joyce, 2011).

Un estudio realizado por el Distrito de Riego Imperial (IID), muestra una gran cantidad de recursos geotérmicos en el Valle Imperial. Lo cual podría crear entre 5,000 y 6,000 empleos, sostenible durante un largo periodo de tiempo (Joyce, 2011).

En las plantas geotérmicas instaladas en Valle Imperial, un atractivo negocio a base de litio va cobrando auge, en los últimos años se ha convertido en el principal punto de interés de inversionistas extranjeros ya que es un metal utilizado en la elaboración de baterías de tipo alcalino, por lo tanto es un recurso muy valioso que no está siendo utilizado y que puede representar una fuente de ingresos económicos muy importantes (Reyes, *et al*, 2010). De acuerdo al Servicio Geológico de EE.UU. Simbol planea aprovechar una planta geotérmica de 50 megavatios cerca de Salton Sea, en el Valle Imperial de California, que bombea salmuera caliente de las profundidades para generar vapor y así mover una turbina, para finalmente producir energía eléctrica. Años atrás la planta inyectaba la salmuera, que contenía un 30 por ciento de sólidos disueltos, entre ellos litio, manganeso y zinc, de nuevo en el suelo, pero actualmente Simbol desvía la salmuera de la planta de energía, antes de su reinyección, hacia sus equipos de procesamiento. Allí, la salmuera aún caliente fluye a través de un medio propiedad

de la empresa que filtra las sales en cuestión de horas. Simbol también ha adquirido activos y propiedad intelectual para un proceso de purificación que crea el carbonato de litio de más alta pureza en el mundo. La planta comercial, cerca de Salton Sea, tiene capacidad para producir 16.000 toneladas anuales de carbonato de litio. El tercer productor más grande, en comparación, genera 22 mil toneladas.

En 2020, Simbol planea triplicar la producción mediante la ampliación a más plantas geotérmicas (MIT Technology Review, 2013). En 2010 la demanda mundial de productos químicos de litio fue de alrededor de 102.000 toneladas, se espera que suba hasta las 320.000 en 2020, principalmente debido al incremento del uso de vehículos eléctricos.



3. PLANTEAMIENTO DE PROPUESTAS ESTRATÉGICAS PARA MITIGAR EL IMPACTO AMBIENTAL PRESENTE EN CGCP

Existen diversas formas de mitigación que pueden reducir el impacto ambiental generado en la actualidad por el CGCP, siguiendo algunas acciones técnicas que el Director General de la CFE presentó ante la Comisión Permanente del Honorable Congreso Mexicano perteneciente a la Central geotermoeléctrica Cerro Prieto (CFE, 2011):

- Los directivos de la CFE deben elaborar un programa para remediar la zona.
- Tratamiento de agua generada en las unidades de condensación con fines de aprovechamiento del agua que se descarga desde las plantas de energía, para riego de áreas verdes, usos en servicios sanitarios y otros.
- Proyecto de Reinyección en Caliente, cuyo objetivo es recargar el yacimiento, directo de los pozos a profundidades de 2 mil metros para que no perjudique al ambiente, tal como se hace en la planta geotérmica de Heber, California (Rosas, 2005).
- Programa de Construcción de Islas para la Separación de la Producción de Vapor de Pozos nuevos, con el fin de concentrar, en islas de separación, la producción de vapor de diversos pozos en un número menor de sitios alejados de la periferia del campo, reduciendo el impacto a las comunidades aledañas por el ruido ocasional que estos generan.

- Revestimiento con Concreto Hidráulico de los Canales de Conducción de Salmuera para obtener un control eficiente y más seguro en la conducción de salmuera a la laguna de evaporación.
- Reducción de la superficie de la Laguna de Evaporación conforme a criterios de SEMARNAT.
- Abatimiento de Ácido Sulfhídrico en el Ambiente de hasta el 80% de la emisión, mediante la utilización de productos químicos reductores en la corriente de gases incondensables y en las torres de enfriamiento.
- Control de emisiones de benceno, tolueno y xileno, para ofrecer garantías y seguridad a la población.
- Programa de Barreras Naturales Acústicas, a fin de disminuir el ruido ocasional a través de la plantación de especies nativas alrededor del Campo Geotérmico dando prioridad a las zonas que colindan con comunidades.

En términos generales, existen incontables formas de mitigar el impacto ambiental al implementar un uso alternativo a la generación de energía eléctrica, siempre y cuando CFE esté dispuesto a establecer un convenio específico que permita emprender una nueva economía a través del uso directo de éste recurso, destacando entre ellos la puesta en marcha de la planta de extracción y comercialización de Cloruro de potasio (KCl), el uso del recurso para fines terapéuticos, como actualmente se realizan en Niland, CA y en Los Azufres, Michoacán. En realidad serían innumerables las aplicaciones industriales que aprovecharían el calor geotérmico (Tabla 7). Las aguas geotérmicas son adecuadas para procesos como el manipulado de la pasta de celulosa en la

industria del papel, por otro lado los aportes de calor del fluido se pueden aplicar en la industria del secado y envasado de ciertos alimentos, y a temperaturas más elevadas, en el propio proceso de los alimentos en la industria conservera. El agua caliente resulta adecuada para máquinas de lavado, estaciones de lavado de vehículos, refrigeración por absorción a diversas temperaturas, lavado y secado de lana, fermentación, producción de ácido sulfúrico, manufactura de cemento, así como para el secado de la madera, baños termales, natación, esterilización de batas y sábanas de hospitales (Llopis y Rodrigo, 2008).

En algún tiempo la CFE desarrolló algunos usos directos de la energía geotérmica, por ejemplo el fluido se ha empleado como un deshidratador de frutas y verduras, un invernadero, e incluso como un sistema para la calefacción de instalaciones, de hecho en el edificio principal del campo de Cerro Prieto existe un sistema de aire acondicionado instalado, el cual utiliza un sistema de refrigeración por absorción de vapor geotérmico y el mismo procedimiento se utiliza en las plantas Cerro Prieto II y III (Hiriart, 2004), también se han realizado varios estudios en el uso de salmueras geotérmicas residuales para la cría de peces. Incluso otorgó CFE una licencia a una empresa privada, a la cual le permitió utilizar el calor residual geotérmico para la producción de alimentos y para uso industrial, mediante el establecimiento de granjas e industrias, que requieren vapor de proceso de bajo costo (Mañón, 1984), sin embargo en los últimos años ha incrementado el interés por las bombas de calor geotérmico (BCG) las cuales pueden usarse para proporcionar enfriamiento y calefacción (García y Martínez, 2012). En la BCG la fuente consiste en un recurso geotérmico a temperatura constante, éste se encuentra ya sea directamente en el suelo (2m a 3m de profundidad, sistemas de circuito cerrado) o en el agua subterránea (10 m de profundidad, sistemas de circuito abierto), presentan grandes ventajas: consumen menos energía para operar, usan un recurso de temperatura constante, no requieren un suplemento adicional de energía para mantener acondicionado el espacio durante

temperaturas exteriores extremas, usan menos refrigerante, son más simples en diseño y mantenimiento, entre otras (Barragán, 2011).

El diseño de las actuales bombas de calor en la geotermia ofrece un doble beneficio puesto que aprovechan el calor de los fluidos de desecho y tienen la capacidad de transformar la salmuera geotérmica en agua de alta pureza. En los últimos años se ha desarrollado un sistema experimental para purificación de salmuera geotérmica integrado a una bomba de calor por absorción, el cual fue construido y probado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas. En toda la etapa de experimentación se obtuvo agua pura. La capacidad máxima alcanzada de producción de agua pura de este sistema fue de 4.3 kg/h, mostrando un rendimiento en términos del Coeficiente Real de Rendimiento (COP) de 1.4. Estos resultados se consideran alentadores para la proyección de unidades a escala industrial que puedan ser operadas con calor geotérmico y/o solar (Santoyo, et al., 2000).

El aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos en todas sus formas es una de las metas globales importantes que se deben lograr en los siguientes años. Ello ha motivado la investigación y desarrollo de nuevos sistemas, entre los que destaca la purificación de la salmuera geotérmica a través de una tecnología que emplee eficientemente los recursos energéticos naturales sin que afecte las condiciones del medio ambiente.

Hoy en día el uso de las bombas de calor en la geotermia ofrece un atractivo comercial interesante dado que no sólo aprovechan el calor de los fluidos que se desechan en los pozos geotérmicos, sino que además tienen la capacidad de transformar la salmuera geotérmica en agua de alta pureza, permitiendo con ello

su empleo ya sea de tipo agrícola, industrial o para descanso. Adicionalmente, es importante enfatizar que las bombas de calor por absorción utilizan energía de baja calidad gratuita y ambientalmente limpia.

La operación de esos sistemas basados en bombas de calor tiene como característica especial su bajo consumo de energía de alta calidad, contribuyendo de esta manera a no emitir contaminantes a la atmósfera, tales como el CO₂ y CH₄, SO₂ y NO₂ principales generadores del efecto invernadero y del fenómeno de lluvia ácida, respectivamente. A continuación se presentan los resultados experimentales derivados del diseño, desarrollo, operación y aplicación de una nueva tecnología de purificación de salmueras geotérmicas y/o efluentes industriales basada en bombas de calor por absorción.

Los sistemas de purificación asistidos por una bomba de calor por absorción comparados con los sistemas convencionales de purificación presentan las siguientes ventajas:

- Son más eficientes energéticamente en términos de consumo de energía primaria [kJ/kg de producto].
- Son capaces de producir productos de muy alta pureza.
- No necesitan de adición continua de productos químicos en el proceso de absorción.
- Pueden adaptarse para recuperar y/o concentrar componentes químicos de interés comercial.
- Casi no requieren de mantenimiento ni de ajuste de condiciones.

- Son simples y pueden ser portátiles como para ser transportados por un camión o una camioneta.

Adicionalmente, el sistema de purificación de agua asistido por una bomba de calor por absorción puede emplearse potencialmente en donde existen recursos geotérmicos de baja entalpía, con una doble ventaja que ofrece el recurso geotérmico: puede emplearse como fuente de calor y como fuente de abastecimiento de agua pura una vez purificada la salmuera geotérmica, lo cual es especialmente útil en regiones donde el agua es escasa (Holland et al., 1992).

Actualmente la CFE no permite que se emplee este recurso de manera directa, aunque se han puesto en marcha diversos proyectos para la utilización de éste, todos han sido, “pruebas piloto”, tan solo para demostrar que existe una amplia gama de aplicaciones directas, pero dichos proyectos se han desvanecido con el tiempo, es por ello que la sobre explotación desmesurada del recurso ha ocasionado problemas de contaminación al medio ambiente que finalmente repercute en la salud de los trabajadores de la planta geotérmica y de los pobladores de la zona.

Tabla 7. Usos directos de la geotermia

Temperatura °C	Usos
200	
180	Evaporación de soluciones altamente concentradas.
	Refrigeración por absorción de amoníaco, digestión de pasta papelera (Kraft).
	Agua pesada mediante un proceso con sulfuro de hidrógeno.
160	Secada de alimento para pescado, secado de madera.
	Alumina mediante el proceso Bayer.
140	Secado de productos agrícolas a altas velocidades, enlatados de alimentos.
120	Extracción de sales por evaporación, evaporación en la refinación de azúcar.
	Agua dulce por destilación.
	Concentración de solución salina mediante evaporación de efecto múltiple.
	Secado y curado de planchas de hormigón ligero.
100	Secado de materiales orgánicos, algas, hierba, hortalizas, etc.
	Lavado y secado de lana.
	Secado de pescado, operaciones intensas de descongelamiento.
80	Calefacción ambiental.
	Refrigeración (límite de temperatura inferior).
60	Zootecnia.
	Invernaderos mediante una combinación de calefacción ambiental y de foco.
	Cultivo de setas.
40	Calentamiento de suelo, balneología.
	Piscinas, biodegradación, fermentaciones.
	Agua caliente para la industria minera durante todo el año en climas fríos.
	Descongelamiento.
20	Criaderos de peces. Piscicultura.

Fuente: UPME, 2003



4. CONCLUSIÓN Y PROPUESTAS

Considerando de manera objetiva algunas de las propuestas planteadas por parte del Director General de la CFE, se puede determinar que éstas se encuentran un tanto alejadas de la realidad, por el hecho de que al elaborar un proyecto de remediación, se debe presentar la mayor objetividad posible y marcar los tiempos de cada etapa. Al poner en marcha el programa de barreras naturales acústicas, mediante la plantación de árboles nativos se deben considerar ciertos criterios específicos, y realizar estudios para determinar la viabilidad del proyecto antes de proceder a la adquisición de las especies del árbol a plantar, para evitar una mala inversión y ello queda ratificado cuando en un intento por detener la inevitable erosión de los suelos del CGCP, se procedió a la plantación masiva de árboles en la zona, lo cual fue un fracaso debido a que muy pocos árboles lograron sobrevivir hacia el final del primer año, si bien el objetivo fue diferente, no se consideraron las variables pertinentes, porque se debe tener en claro, que si lo que se pretende es plantar en una zona erosionada, lo ideal es comenzar introduciendo especies pequeñas como las gramíneas que presentan menos exigencias en cuanto a la cantidad de nutrientes requeridos para su desarrollo y con el paso del tiempo ir ganando cierta cobertura de materia orgánica en el suelo, y es cuando llegado a ese punto se puede proceder a evaluar la viabilidad de introducir especies más grandes. Una medida que resulta más factible para disminuir el ruido, considerando el tiempo de respuesta, consiste en implementar silenciadores a las turbinas generadoras, si bien no deben descartarse las barreras naturales acústicas para atenuar las perturbaciones, se debe tener muy claro que es un proceso paulatino, que puede llevar años, debido a la erosión del suelo.

En cuanto a las propuestas aplicables a la salmuera, se debe tomar mayor asertividad al respecto, puesto que representa un impacto económico positivo el comercializar carbonato de litio y cloruro de potasio (KCl), el cual se obtiene al desviar la salmuera caliente de la planta de energía hacia equipos con un proceso de purificación antes de enviarla a la laguna de evaporación. En 1985 se planeó instalar un sistema para la extracción y comercialización de KCl por el cual se llegarían a producir 80,000 toneladas métricas por año, desafortunadamente nada más se construyó el caracol de concentración de salmuera residual y nunca se llegó a la construcción de la planta que hubiera ayudado en mucho a la economía de Baja California, ya que se importa este fertilizante (KCl) en grandes cantidades por el tipo de tierra que caracteriza al estado (biblioteca digital, 2013).

Actualmente el área designada al proyecto es una zona más de descarga para la salmuera residual (Figura 6), porque en los últimos años la laguna de evaporación continúa extendiéndose sin medida, debido a dos factores, el primero que tiene que ver con una explotación no sustentable del recurso y el segundo está más relacionado a las propiedades fisicoquímicas del fluido, donde el sílice al mezclarse se une con el oxígeno, formando un óxido de sílice que es como un polvo cementante y pesado que cae a la base de la laguna y evita que el fluido se filtre, permitiendo únicamente flujo hacia los lados. Al llevar a cabo ese proceso, se obtendría una reducción del volumen final de salmuera que se debería reinyectar en su totalidad a los pozos muertos, evitando mayor contaminación del suelo y del acuífero superficial del Valle, con lo cual se estaría ahorrando costes para el revestimiento con concreto hidráulico de los canales de conducción de salmuera a la laguna de evaporación que se ha propuesto ante la Comisión Permanente del Honorable Congreso Mexicano perteneciente a la Central geotermoeléctrica Cerro Prieto.

El CGCP ya ha intentado, sin éxito, la reducción de emisión de ácido sulfhídrico en el ambiente, mediante la utilización de productos químicos reductores en la corriente de gases incondensables y en las torres de enfriamiento, lo cual muestra una apertura al desarrollo científico y tecnológico. La propuesta de establecer un control de emisiones de benceno, tolueno y xileno para garantizar la salud de los trabajadores de la planta geotérmica y de la comunidad vecina aún falta mucho por lograr, puesto que las normas existentes en México que establecen los límites máximos permisibles de descarga de contaminantes al medio ambiente, no son aplicadas por el CGCP, como consecuencia de la inexistente interacción con las agencias ambientales locales (estatal y municipal).



Fig. 6 Zona que se destinó en al proyecto de extracción de KCl a partir de la salmuera residual. Fuente: Propia

En base a los objetivos planteados al inicio del proyecto se puede determinar a manera de conclusión lo siguiente:

a) El aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos en todas sus formas es una de las metas globales importantes que se deben lograr en los siguientes años. Ello ha motivado la investigación y desarrollo de nuevos sistemas, entre los que destaca la purificación de la salmuera geotérmica a través de una tecnología que emplee eficientemente los recursos energéticos naturales sin que afecte las condiciones del medio ambiente.

b) La zona fronteriza entre Valle Imperial y el Valle de Mexicali plantea importantes desafíos sociales, económicos, y ambientales enmarcados en parte a la explotación del recurso geotérmico. Sin duda ambos sistemas geotérmicos continuarán expandiéndose a un ritmo acelerado debido a la demanda del sector energético, en Mexicali se estimó una tasa de crecimiento del 7.5 % anual para la electricidad de Baja California (Sweedler, *et al*, 2003), mientras que en Valle Imperial la tasa de crecimiento del consumo de energía eléctrica de 2.5% continua estable (Sandoval, 2002).

c) Un aspecto importante que se hace notar es la política ambiental vigente que existe en ambas naciones, eso influye directamente en la preservación del medio ambiente y su protección, debido a que la normatividad establece los límites máximos permisibles de descarga de contaminantes hacia el ambiente. En el caso de México es necesario reajustar el sistema, a fin de que se tomen las medidas necesarias que contribuyan a aminorar el impacto que se está presentando actualmente en el CGCP (Figura 7).

d) También se debe pensar en una explotación que resulte sustentable, y que además se proceda a la reinyección total de la salmuera residual en el CGCP ya que ayudaría en gran medida a mitigar los daños causados al dejar que ésta se

acumule en la laguna de evaporación (Figura 8) y que a su vez la salmuera residual caliente, una vez separada del vapor pueda ser usada potencialmente para la producción de electricidad utilizando el ciclo binario, tan popularizado en Valle Imperial.



Fig. 7 Infraestructura del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Fuente: Propia

e) En Valle Imperial existe la tendencia de utilizar recursos renovables como la energía solar, el viento y la micro hidráulica, y cada vez se alejan más de la geotérmica. Es una buena mezcla que esperamos Mexicali sea capaz de combinar en un corto período de tiempo, más ahora que California tiene como objetivo generar el 33% de su suministro de energía eléctrica para el año 2020 a partir de recursos renovables.

f) Finalmente se cree conveniente destacar la existencia de una amplia gama de oportunidades de trabajo que plantea la explotación del recurso geotérmico en ambas naciones, vinculada no sólo a la producción de electricidad y usos directos, sino también a la calidad de vida de los consumidores finales.



Fig. 8 Panorama de los ejidos cercanos a CGCP. Fuente: Propia



BIBLIOGRAFÍA

Aguilar D. A., "Situación actual y alternativas de exploración y explotación en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC"; Geotermia, Vol. 23, No. 2, Julio-Diciembre 2010, pp. 34-39.

AIR POLLUTION CONTROL DISTRICT, "Conditions for authority to construct and permit to operate #2000H-3", March 5, 2009,. pp. 1-14.

Albertsson A., Blondal A., Barkarson B. H., Jonsdottir S. and Gunnar Thors S., "Environmental Impact Assessment of Geothermal Projects in Iceland", Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

Azcarate V. A, "Contamina CFE el Valle, inutiliza 200 hectáreas". La Crónica. Mexicali, B. C. Viernes 16 de marzo 2001.

Barragán R. R. M., Arellano G. V. M. y García G. A., "Uso directo de la energía geotérmica en acondicionamiento de espacios: Bombas de Calor Geotérmicas", Boletín IIE, Breves Técnicas, Octubre-Diciembre 2011, pp. 166-168.

Barragan R. M., et al., "A preliminary interpretation of the gas composition of the CP IV sector wells of the Cerro Prieto field, Mexico". MEMORIAS DEL CONGRESO ANUAL 2006 CERRO PRIETO, BC, SEPTIEMBRE DE 2006, pp. 50-53.

Biblioteca digital, "V. México y su riqueza geotérmica", Disponible en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/058/htm/sec_8.htm (Visitado el 02 de agosto de 2013).

Brown K. L., "Impacts on the physical environment", World Geothermal Congress, International Geothermal Association, Japanese Organizing Committee for WGC2000, 8-10 June 2000, pp. 43-56.

CalEnergy Operating Corporation, "Thermal Oxidizer and Scrubber for benzene and hydrogen sulfide abatement", Air Pollution Control District, Imperial County, 2008, pp. 1-14.

CFE, "Programa de Desarrollo Tecnológico y Social, en torno a la geotermoelectrica Cerro Prieto, Mexicali B.C." Vinculación Institucional, México D.F. 2011.

Chacare A., Cabeza M., de Arconada M. y Misle B. P. J., "Análisis comparativo del procedimiento de evaluación de impacto ambiental venezolano (decreto 1.257) en el contexto norteamericano, latinoamericano y europeo", Terra Nueva Etapa, vol. XXII, núm. 32, pp. 41-75, Universidad Central de Venezuela, Venezuela, 2006.

Elders, W.A., Bird D. K., Williams A. E. and Schiffman P., "Hydrothermal flow regime and magmatic heat source of the Cerro Prieto Geothermal system, Baja California", México, Geothermics, Volume 13, Issues 1-2, 1984, pp. 27-47.

Gallegos O. R., "La generación de energía eléctrica en Baja California y su relación con la emisión de contaminantes a la atmósfera", tesis de Maestría, Instituto de Ingeniería, UABC, 1997.

García G. A. y Martínez, E. I., "Estado actual de desarrollo de las Bombas de Calor Geotérmico", IIE, Geotermia, Vol. 25, No. 2, Julio-Diciembre 2012, pp. 58-59.

García R. G., "Demandan revisar normas de seguridad en Cerro Prieto". La voz de la frontera, Mexicali B.C. 18 de mayo 2011.

Glowacka E., et al, Red de instrumentación geotécnica en el Valle de Mexicali, BC. Memorias del Congreso Anual 2006, Cerro Prieto, B.C, Septiembre de 2006.

Gutiérrez N. L. C. A., Maya G. R., y Quijano L. J. L., “Current Status of Geothermics in Mexico”. Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

Gutiérrez N. L.C.A., y Quijano L. J. L., “Update of geothermics in México” Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, April 2005.

Gutiérrez P. H. y Ribó M.O., “Reinjection experience in the Cerro Geothermal field, Geothermal Resources Council Transactions”, Vol. 18, 1994, pp. 261-267.

Hiriart, G., “Otros usos de la energía geotérmica”. Memorias de la Sexta Reunión Institucional de Calidad Total. Internal publication of CFE, Mexico, Unpublished, 2004.

Hiriart, G. & Del Rio, L., “Mexican experience in geothermal power generation”. Proceedings of the World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, 18.-31.5.1995, 2025-2030.

Holland, F.A., C.L. Heard, D. Nieva y R. Best, “Developments in geothermal energy in Mexico-Part 40: The future for geothermal energy in Mexico”. J. Heat Recovery Systems & CHP, 12 (6), 1992, pp. 451-456.

Ibarra G. I., “Planta geotérmica en Cerro Prieto sigue explotando tierras”, El Financiero, 06 de Abril 2014.

Inter-American Development Bank, “Evaluación de la Energía Geotérmica en México”, Informe preparado para la CRE, con el apoyo de BID, México 2012.

Joyce E., “Geothermal Plants Could Boost Imperial Valley Economy”, San Diego State University, February 7, 2011.

KEMA Inc., Eastern Research Group, Inc. (ERG), Sierra Nevada Air Quality Group LLC (SNAQG), Alliance Consulting International (Alliance), "Evaluación de los requisitos que se necesitan para introducir compraventa de créditos de emisiones transfronterizas entre Baja California, México y California". Reporte del consultor, (preparado para: Comisión de Energía de California), Febrero 2009.

Lawrence Berkeley Laboratory. Earth Sciences Division, Mexico. Comisión Federal de Electricidad. Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, United States. Dept. of Energy. Division of Geothermal Energy, "Proceedings/actas, first Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California". Mexico, September 20-22, San Diego, California, University of California, 1978.

Lippmann M.J. y Bodvarsson G.S., "A modeling Study of the Natural State of the Heber Geothermal Field, California". Geothermal Resources Council, Annual Meeting, Portland, OR, October 1983.

Lippmann, M.J., Truesdell, A.H. and Gutiérrez Puente, H., "What will a 6 km deep well at Cerro Prieto find?", Proceedings, Twentyfirst Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford California, January 27-29, 1997, SGP-TR-155, 19-28

Llopis, T. G. y Rodrigo, A. V., "Guía de la energía geotérmica" Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Energy Management Agency, Intelligent Energy Europe, 2008, pp. 35-81.

Lund W. J., R. Gordon Bloomquist, Tonya L. Boyd and Joel Renner, "The United States of America Country Update", Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, April 24-29, 2005, pp. 29-45.

Lund, W. John, Karl Gawell, Tonya L. Boyd and Dan Jennejohn, "The United States of America Country Update 2010", Proceedings, Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 1-3, 2010, SGP-TR-188.

Mañón M. A., "Recent Activities at Cerro Prieto. Geothermal Resources Council", TRANSACTIONS, Vol. 8, August, 1984, CFE.

Mercado, S., Bermejo, F.J. y Fernandez, H., "Developments in geothermal energy in México-Part Fourteen. Environmental aspects of geothermal systems". J. Heat Recovery Systems & CHP, 8(3), 1988, pp.185-202.

MidAmerican Energy, "Imperial Valley Geothermal Units", Just the facts, Brawley, California, February 2005.

MIT Technology Review, "Una *start-up* planea capturar litio a partir de plantas geotérmicas", Por Prachi Patel, Traducido por Francisco Reyes (Opinno), Noviembre 2013.

Monitor Económico, PNI 2014-2018 contempla 11 millones de pesos para Baja California, 29 de abril 2014, pp. 6-7.

Muñoz M. G., Díaz G. E., Campbell R. H. E. y Quintero N. M., "Baja California: Perfil Energético 2010-2020", Propuesta y Análisis de Indicadores Energéticos para el Desarrollo de Perspectivas Estatales. Mexicali, Baja California, 2012, pp. 155-157.

Ortega A. C., "Busca CFE expropiar predios en el ejido Nuevo León". La Crónica, Local, lunes 25 de junio 2001, Mexicali, B. C.

Padgett H., "El sospechoso negocio del vapor. La CFE compra a particulares bienes que son propiedad de la nación", EMEEQUIS 16 de Febrero 2009, pp.31-38.

Pelayo A., Razo L. A., Gutiérrez N. L. C. A., Arellano G. F., Espinoza J. M., and Quijano J. L., "Main geothermal fields of México: Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Geological Society of America", The Geology of North America Vol. P-3, Economic Geology, México 1991, 23-58.

Portugal E., et al., Estudios geocientíficos del Polígono Hidalgo del campo geotérmico de Cerro Prieto, Informe IIE/11/12875, para la CFE, 2006.

Quintero N. M., Cuaya S. M. E., Canales R. M.A., García C. O. R., Santillán S. N., Ojeda B. S., and Velázquez L. N., "A Comparative Study on the Environmental Impacts of a Binational Geothermal System: Imperial Valley, CA., U.S.A. and Cerro Prieto, Mexicali Valley, BC, México", Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

Quintero N. M., León-Diez C. and R. I. Rojas C., "Environmental impact of two energy systems in the State of Baja California: Geothermoelectric and Thermoelectric Power Plants", International Symposium on "Heat and mass transfer in Energy Systems and Environmental effects", Cancun, Mexico, August 22-25, 1993, pp. 457-462.

Quintero N. M. y Sweedler A., "Perfil energético de la región fronteriza de Baja California y California con énfasis en el valle de Mexicali e Imperial". Desarrollo y medio ambiente de la región fronteriza México-Estados Unidos, Valles de Imperial y Mexicali. Universidad Autónoma de Baja California, Ed. Miguel Ángel Porrúa, México 2005a, pp. 289-307

Quintero N. M., y Sweedler A., "Perspectiva Energética en Mexicali y Valle Imperial", Revista Universitaria, 3-252, 2005b, pp. 14-23.

Ramírez H. J., García S. G., “Chemical evolution of disposal brine of the Cerro Prieto geothermal field during its transport toward surrounding soils, Mexico“, *Environmental Geology*, Springer-Verlag, DOI 10.1007/s00254-004-1075-3, 2004, pp. 1-13.

Ramírez, J. A., Interoffice Memorandum. IVAQCD. Imperial Valley, California 2014.

Ramos G. J. M., “Gestión estratégica ambiental del aire en la frontera Mexicali-Imperial”, *Estudios Fronterizos*, nueva época, vol. 12, núm. 24, julio-diciembre 2011, pp. 35-53.

Reyes R. E., “Minuta de la Reunión del Equipo de Trabajo de Calidad del Aire, Mexicali/Imperial”, 23 de Septiembre 2010, Calexico. pp. 1-3.

Rosas L., “Cerro Prieto contamina seis ejidos”, *Revista Contralínea Baja California*, 2005.

Salaices E., et al., “Modelo hidráulico de la red de vapoductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C. México”. *Geotermia*, Vol. 20, No. 1, Enero-Junio 2007.

Salveson, J.D. y Cooper, A.M., “Exploration and development of the Heber geothermal field, Imperial Valley, California”, Chevron Resources Company. San Francisco, USA, November 1981, pp. 82-85.

Sandoval, J.C., “Imperial Irrigation District”, conversación con el autor, California, El Centro, Febrero 2002.

Santoyo-Gutiérrez, S., J. Siqueiros, C.L. Heard, E. Santoyo and F.A. Holland, “An Experimental Integrated Absorption Heat Pump Effluent Purification System”. Part II: operating on water/carrol solutions, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20 (3), 2000, pp. 269-284.

Sarychikhina, O., Glowacka E., Suárez V. F., Mellors R. y Ramírez H. J., "Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali", Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 63, Núm. 1, 2011, pp. 1-13.

Shandilya P., S.S. Phogat, G. S. Mahal, S. Balaji and Sudhir Bhartiya. Collection, handling and treatment of liquid effluents in thermal power plant. BHEL Journal. Vol. 27, numero 2. 2006, pp. 45-55.

Siega F. L., et al., "Gas equilibria controlling H₂S in different Philippine geothermal fields", Proceedings 20th Annual PNOC-EDC Geothermal Conference. Manila Filipinas, 1999, pp. 29-35.

Stallard M.L., et al., "Patterns of change in water isotopes from the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: 1977-1986", Geothermal Resources Council Transactions. 11, 1987, pp. 203-210.

Suárez V. F., González M., Munguía O. L., Wong O. V., Vidal A. y González G. J., "Distribución de daños materiales en el Valle de Mexicali, B.C., ocasionados por los sismos de 1 de Junio y 10 de Septiembre, de 1999, MW=4.8", GEOS, Unión Geofísica Mexicana, A.C., Abril 2001, pp. 22-29.

Sweedler, A., N.M. Quintero, y K. Collins, "Energy Issues in the U.S. –Mexican Binational Region: Focus on California –Baja California", en David A. Rohy (ed.), *Trade Energy, and the Environment: Challenges and Opportunities in the U.S. – Mexican Border Region, Now and in 2020*, San Diego State University Press. 20, Río Rico, Arizona, abril 30- mayo 2, 2003, pp. 57-103.

The California Energy Commission, Energy Almanac, "Types of Geothermal Power Plants", CA. GOV, State of California. Disponible en: <http://energyalmanac.ca.gov/renewables/geothermal/types.html> (visitado el 30 julio de 2013)

UPME, "Utilización de la Energía Geotérmica (Documento Descriptivo)", Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión, Versión 00, Marzo 2003, pp. 15-22.

Vaca S. J. M. E., "Cost model for geothermal wells applied to the Cerro Prieto geothermal field case, B. C.", Geotermia, Vol. 21, Enero-Junio 2008.

