

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROYECTO DE AMPLIACIÓN DEL CAMPO  
GEOTÉRMICO  
LOS HUMEROS, ESTADO DE PUEBLA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO GEÓLOGO**

**PRESENTA**

**ESTEBAN JIMÉNEZ SALGADO**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
60-I-1076

SR. ESTEBAN JIMÉNEZ SALGADO  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Leovigildo Cepeda Dávila y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**“PROYECTO DE AMPLIACIÓN DEL CAMPO GEOTÉRMICO  
LOS HUMEROS, ESTADO DE PUEBLA”**

**INTRODUCCIÓN**

**OBJETIVO**

**HIPÓTESIS**

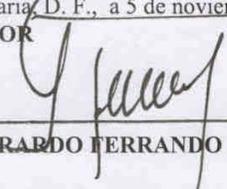
- I ANTECEDENTES Y PANORAMA ENERGÉTICO**
  - II ASPECTOS TÉCNICOS**
  - III ESTUDIOS DE EXPLORACIÓN**
  - IV CARACTERÍSTICAS DEL YACIMIENTO**
  - V MODELO CONCEPTUAL DEL CAMPO**
  - VI EVALUACIÓN DEL RECURSO Y ELABORACIÓN DE LA PROPUESTA**
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**  
**BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar, en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis, el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**  
Cd. Universitaria, D. F., a 5 de noviembre de 2005.  
**EL DIRECTOR**

  
M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*JAGC\*vgc  


Una nebulosa de fuego y un planeta  
Un cristal y una célula  
Una medusa y un saurio  
Y las cuevas, morada remota del hombre.  
De aquí, un sentido de ley y belleza  
Y una imagen de lejanía de la tierra,  
Algunas llaman evolución  
Y otros dicen que es Dios.

William Erbert Carruth

## **A Dios**

A mi esposa Verónica  
Por todo el apoyo, el amor, paciencia, inspiración y confianza.

A mis Hijos Josué y Alitzel  
Por ser una fuente de inspiración y apoyo. Con mucho amor

A mis padres  
Silvino  
Flavia †  
Con el amor de Siempre

A mis hermanos, Iracema, Benito  
Gracias

Al los ingenieros  
Leovigildo Javier Cepeda Dávila  
Miguel I. Vera Ocampo  
German Ramírez Silva  
Sin sus consejos y apoyo para este trabajo esto no sería posible.

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo, se realizó con apoyo de la Residencia de Los Humeros Pue., de la Comisión Federal de Electricidad, cuyo residente es el Ing. Abelardo Vázquez Sandoval. A quien agradezco las facilidades y el apoyo brindado en la realización del presente trabajo.

Al Ing. Leovigildo Javier Cepeda Dávila, no solamente por sus recomendaciones y consejos aportados a este trabajo, sino por el apoyo, la confianza y amistad brindada a lo largo de la presente.

Al Ing. Miguel I. Vera Ocampo por su ayuda y amistad que siempre estuvo dispuesto a brindar y que gracias a sus consejos, se culminó una meta trazada.

Ing. German Ramírez Silva, por sus comentarios y consejos que aportaron ideas para la realización de este trabajo

A todos mis maestros y compañeros que me ayudaron en mi formación profesional.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, con cariño y a el orgullo de pertenecer a sus egresados.

Al Jurado revisor de esta tesis:

Ing. Leovigildo Javier Cepeda Dávila

Ing. Miguel I. Vera Ocampo

Ing. Miguel Ángel Ruvalcava Sepúlveda

Ing. Pablo García Y Colomé

Ing. Héctor Luís Macías Martínez..

A Carolina, Mario, Josué, Angélica, José Juan, Andrea, José Juan (chico).

A todos Gracias.

## Índice

Capítulos	Página
Introducción	1
Objetivo	2
Hipótesis	3
I Antecedentes y panorama energético	4
II Aspectos técnicos	6
III Estudio de exploración	7
IV Características del yacimiento	21
V Modelo conceptual del campo	23
VI Evaluación del recurso y elaboración de la propuesta	25
Conclusiones y recomendaciones	48
Bibliografía	49

## Índice de tablas

Tabla 1.- Fuente de generación por capacidad instalada	4
Tabla 2.- Unidades generadoras	6
Tabla 3.- Nomenclatura y correlación de unidades presentes dentro de la caldera de Los Humeros	9
Tabla 4.- Unidades geohidrológicas	19
Tabla 5.- Parámetros de evaluación volumétrica	25
Tabla 6.- Parámetros considerados para la simulación numérica	29
Tabla 7.- Condiciones de operación de los pozos por sector	32
Tabla 8.- Cimas litológicas de los pozos propuestos	35
Tabla 9.- Coordenadas de los pozos propuestos	35
Tabla 10.- Temperaturas estabilizadas por Horner	41
Tabla 11.- Temperaturas medidas	41
Tabla 12.- Presiones medidas	44
Tabla 13.- Gastos de Vapor y agua	46

## Índice de figuras

Figura 1.- Generación por fuente	4
Figura 2.- Croquis de localización del campo geotérmico Los Humeros	7
Figura 3.- Plano geológico simplificado de Los Humeros, pue.	10
Figura 4.- Sección geológica E-W	15
Figura 5.- Sección geológica N-S	16
Figura 6.- Contenido relativo de cloruros-sulfatos y bicarbonatos del año 2004	21
Figura 7.- Evolución de la presión, temperatura y entalpía del yacimiento para una capacidad de generación de 268 MW	27
Figura 8.- Evolución de la presión del yacimiento respecto al tiempo de	

extracción con una potencia instalada de 35 MW	28
Figura 9.- Ortofoto procesada del área de interés donde se propone la perforación de nuevos pozos productores	33
Figura 10.- Columnas litológicas de los pozos propuestos	36
Figura 11.- Sección geológica donde se muestra la ubicación posible del pozo Hprop-15	38
Figura 12.-Sección donde se muestran los pozos Hprop-11, Hprop-12	39
Figura 13.-Temperaturas estabilizadas por horner a 1000 msnm	42
Figura 14.- Temperaturas medidas a 1300 msnm	42
Figura 15.- Temperaturas medidas a 1000 msnm	42
Figura 16.-Temperaturas medidas a 800 msnm	43
Figura 17.- Presiones medidas a 1300 msnm	44
Figura 18.- presiones medidas a 1000 msnm	45
Figura 19.- presiones medidas a 800 msnm	45
Figura 20.- Gastos de vapor a 10 bars	46
Figura 21.- Gasto de vapor a 12 bars	47

## **Álbum fotográfico**

Foto 1.- zona norte	51
Foto 2.- Zona sur	51
Foto 3.- Vista de la unidad No. 3	52
Foto 4.- Vista general del campo	52

## **Anexos**

1.- Plano topográfico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla.	53
2.- Modelo conceptual del campo de Los Humeros, Puebla	54

## **Introducción**

En la residencia del campo geotérmico de Los Humeros, municipio de Xiutetelco, estado de Puebla, operado por la Gerencia de Proyectos Geotérmicos de la Comisión Federal de Electricidad, se realizó un análisis geológico, geológico-estructural, Geohidrológico y un balance de vapor para evaluar la cantidad de energía que se produce para de esta manera incrementar la generación de la misma, por lo cual uno de los objetivos de la residencia es la instalación de una unidad generadora de 25 MW, lo que conlleva el inicio de la perforación de pozos productores.

## **Objetivo**

Analizar el estado actual de la demanda energética, así como las condiciones geológicas y de yacimiento del campo geotérmico de Los Humeros, para elaborar una propuesta de perforación, que incrementará la capacidad de generación de energía, mediante la instalación de una unidad generadora de 25 MW adicionales.

## **Hipótesis**

Si el análisis e interpolación de la información disponible del campo Los Humeros, permiten elaborar las columnas litológicas y condiciones de operación de cada propuesta, apoyándose en las diferentes disciplinas de geología, geofísica y de Ingeniería de yacimientos, entonces se podrán definir los lugares más adecuados para la perforación y construcción de la planta geotermoeléctrica adicional.

## I Antecedentes y panorama energético

Debido al incremento en la demanda de energía eléctrica en México, en los últimos años la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se ha visto en la necesidad de desarrollar proyectos energéticos, como la construcción de plantas hidroeléctricas, termoeléctricas, geotermoeléctricas, entre otras.

En la actualidad ha aumentado la generación de energía geotérmica a nivel mundial y México ocupa el tercer lugar en cuanto a generación, mediante la operación de cuatro campos geotérmicos (Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros y Las Tres Vírgenes), con una capacidad geotermoeléctrica total de 959.50 MW, ocupando el quinto lugar en cuanto a generación por fuente, con un 2.19%, (tabla 1 y figura 1).

Fuente de Generación	Capacidad instalada	Porcentaje
Termoeléctricas	29,421.36	67.28
Hidroeléctricas	9,378.82	21.45
Carboeléctricas	2,600.00	5.95
Núcleo eléctricas	1,364.88	3.12
<b>Geotermoeléctricas</b>	<b>959.50</b>	<b>2.19</b>
Eólica	2.18	0.003
Total	43,726.74	99.99

tabla 1.- Fuente de generación por capacidad instalada (Negrín-Quijano, 2004)

### GENERACIÓN POR FUENTE

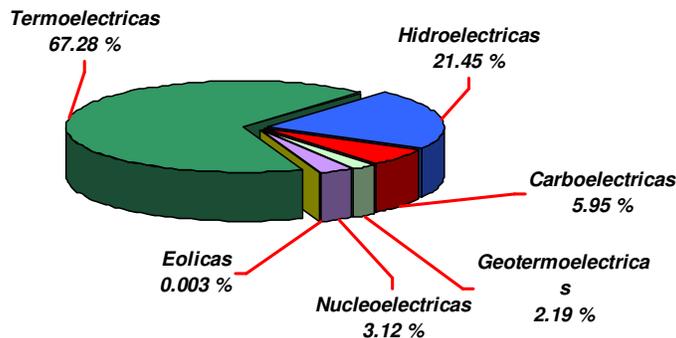


Figura 1.- Generación por fuente (Negrín-Quijano, 2004)

A partir de 1968, la CFE inició los trabajos de prospección geológica, geofísica, geoquímica y geohidrológica del área Los Humeros–Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz, con el fin de localizar sitios de interés geotérmico. En abril de 1981, comenzaron los trabajos de perforación y los estudios correspondientes de Ingeniería de Yacimientos, con el fin de confirmar la existencia de un yacimiento geotérmico.

El campo geotérmico de Los Humeros es el segundo sistema geotérmico mexicano que genera electricidad a partir de fluidos contenidos en roca volcánica, después de Los Azufres, Michoacán. En mayo de 1990 se inició su explotación comercial, tiene actualmente una capacidad instalada de 35 MW con siete unidades a contrapresión de 5 MW, seis en el norte y una en el sur, lo cual lo convierte en el tercero en importancia en el país en cuanto a generación geotermoeléctrica, después de Cerro Prieto, Baja California y Los Azufres, Michoacán

El proyecto describe parte de la estrategia de instalación de una central a condensación de 25 MW netos adicionales, para incrementar la capacidad de generación de energía eléctrica en Los Humeros a 60 MW. Además de presentar el estado actual de los pozos del campo y de las unidades, se hace un análisis de la disponibilidad de vapor en la nueva unidad para programar la futura perforación de pozos productores que satisfagan la demanda de las unidades instaladas.

### **Utilidad de la energía en México**

La Comisión Federal de Electricidad es la compañía que proporciona servicio, reparación, transmisión, generación y distribución de energía eléctrica a 21.3 millones de clientes, casi 80 millones de mexicanos. Tiene 168 plantas generadoras con una capacidad total de 43,727 MW.

Durante los últimos años la geotermia en México ha logrado ocupar un importante lugar dentro de los procesos de generación eléctrica, con cuatro campos: Cerro Prieto (720MW), Los Azufres (188 MW), Los Humeros (35 MW) y Tres Vírgenes (10 MW) dando un total de 953 MW, lo que coloca a México en el tercer lugar mundial. En estos campos se operan unidades de varios tipos (condensación, contrapresión y binarias). En Los Humeros actualmente existen perforados 40 pozos, cuyas profundidades fluctúan entre 1500 y 3250 m, de los cuales 20 son productores integrados a 7 unidades de 5 MW y 2 de reinyección (H-29 y H-38), (tabla 2) y 18 no productores o en observación.

UG	Inicio de operación	Pozos integrados
1	31-May-91	H-3, H-9, <b>H-35 (C) y H-37 compartido(C)</b>
2	01-Sep-91	H-1, H-7 y H-8
3	01-Abr-92	H-6 , H-12 y H-39
4	01-Jul-92	H-16, H-30, H-33, <b>H-35 (C) y H-37 (C)</b>
5	01-Feb-93	H-15 y H-31
6	01-Jun-94	H-11, H-19 y H-20
7	01-Sep-93	H-17, H-32 <b>y H-37 (C)</b>

tabla 2.- Unidades generadoras (UG), (Base de datos CFE, 2005)

Algunos pozos están compartidos, ya que por cada MW que se genera se necesitan 13 t/h de vapor, por lo que cada unidad necesita 65 t/h de vapor, para unidades a contra presión, y si se observa la tabla 2, se pueden ver los pozos que están integrados a una unidad generadora, de ellos se ocupan 375 de 507.7 ton/h de vapor en la zona norte y en la zona sur **62.5 de 130.6 ton/h**; de acuerdo con un balance realizado por el área de mediciones de la residencia de Los Humeros, del cual se tiene en el norte una excedencia de vapor de **132.7 ton/h** y en el sur, de **68.1 ton/h**, lo que da un total de **200.8 ton/h** (tabla 7).

## II Aspectos técnicos

### Localización

El campo geotérmico Los Humeros está situado en la región oriental del estado de Puebla y occidental del estado de Veracruz, a 25.6 Km noroeste de la ciudad de Perote, Ver., entre las coordenadas 19° 37' – 19° 48' de Longitud W y 97° 37' – 97° 48' de Latitud N (figura 2). Se encuentra a una altitud de 2 800 metros y abarca una superficie de 36.9 km<sup>2</sup>. El yacimiento se encuentra alojado en rocas volcánicas, dentro de una caldera de aproximadamente 25 Km de diámetro, la cual se ubica entre los límites de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental.



## **Geología**

### **Geomorfología**

El área de estudio manifiesta notables diferencias en cuanto a sus componentes morfológicos, ya que se encuentra en el límite de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico Transmexicano y La Sierra Madre Oriental, como ya se mencionó previamente.

La Sierra Madre Oriental está constituida principalmente por rocas sedimentarias mesozoicas que se depositaron y evolucionaron sobre un basamento paleozoico, cuya morfología se manifiesta en forma de valles y crestas alargadas en dirección NS-SE. Están cubiertas por las rocas del Eje Neovolcánico Transmexicano que forman grandes mesetas, promontorios dómicos y grandes estratovolcanes que sobresalen por sus formas recientes, de modo que de los rasgos morfológicos de las rocas sedimentarias sólo sobresalieron las partes más altas, como al SW de la caldera Los Humeros.

La caldera los Humeros contiene varios domos riolíticos, entre los que destaca el domo de Oyameles en su porción occidental, mientras que en su centro se presentan como rasgos característicos los colapsos de Potreros y Central, en cuyos alrededores se observan una serie de conos de escoria y arcos andesíticos.

La estructura en forma de caldera presenta un patrón de drenaje radial, pero la presencia de terrenos aluviales en los alrededores de la estructura, tienden a enmascarar los cauces de algunas corrientes.

### **Estratigrafía**

En la zona en donde se localiza la caldera de Los Humeros la secuencia estratigráfica descrita dentro de de la misma, está compuesta por rocas intrusivas, volcánicas, sedimentarias y metamórficas cuyas edades, en trabajos previos, se calcularon desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. Las descripciones se dan en forma breve y fueron realizadas con base en los resultados de estudio de geología de campo (figura 3), y en la descripción de los recortes litológicos de los pozos perforados en esta región, la actividad intrusiva dentro de la caldera se dio en el basamento calcáreo y que provoca el metamorfismo de contacto presente, esta es la principal fuente de calor del yacimiento.

Como parte de la interpretación histórica en la evolución geológica de la caldera de Los Humeros (tabla 3), y que es parte fundamental para evidenciar las amplias posibilidades de explotación geotérmica.

ERA	PERIODO	EPOCA	EDAD	LOS HUMEROS-LAS DERRUMBADAS	CUENCA DE VERACRUZ, OAXACA Y PUEBLA	ZACAPOAXTLA-TLAPACOYAN AREA DEL SISTEMA ATEXCACO	
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE		Aluviòn	Aluviòn de Orìgen Volcànico	Qal	Aluviòn
		PLEISTOCENO	Sedimentos Lacustres y Lahares	Qbv		Piroclastos y Escoria	
			Formaciòn Sn. Ntonio (Andesitas basálticas)	Qpv		Arenas y Cenizas de composiciòn basica	
			Riolita Oyameles	Oro.		Riolita Oyameles	
			Ignimbrita Xaltipàn	Qix./Qla-		Ignimbritas Xaltipàn, Tobas andesiticas y pomèz	
	Terciario	PLIOCENO		Formaciòn Teziutlà	Productos Volcànicos	Tat	Fm. Andesitas Teziutlà
		MIOCENO	TARDIO	Andesita Aleseseca		Fm Filisola Fm. Concepciòn Fm. Encanto Fm Depòsito Fm. Las Lajas Fm. Horcones	
			MEDIO	Fm. Cruz Blanca (Andesita)			
			TEMPRANO	Rocas Ignèas-Intrusivos (Aplitas y Granodioritas)			
		OLIGOCENO	EOCENO		Fm Tantoyuca Fm. Aragòn Fm. Chicontepec	Ts	Fm. Horcones Fm. Chapopote Fm. Huayabal Fm. Aragòn fm. Chicontepec
PALEOCENO		Fm. Velazco					
MEZOSOICO	CRETACICO	Tardio	Fm. Mendez Fm. Mezcala	Fm. Necoxtla Fm. Mèndez	Ks	Fm. San Felipe	
		Medio	Fm. San Felipe Fm. Maltrata	Fm. Maltrata Fm. Guzmantla		Fm. Agua Nueva	
		Temprano	Fm. Agua Nueva Fm Guzmantla	Fm. Orizaba		Km	Fm Tamaulipas Superior
	JURASICO	Tardio	Fm. Tamps Sup. Fm. Orizaba	Fm. Capolucan	Ki	Fm. Tamaulipas Inferior	
		Medio	Fm. Tamaulipas Inferior	Tuxpanquillo	Js	Fm. Pimienta	
		Temprano	Fm. Pimienta	Tenexiholia	Jt	Fm. Tamàn	
			Fm. Tamàn		Ji	Fm Tepexic	
	TRIASICO	Tardio	Fm. Cahuasas				Fm Cahuasas (Conglomerados, rocas Volcànicas y diques riolíticos)
		Medio	Fm. Huayacocotla	Fm. Huayacocoyla, Aljalpan			
		Temprano	Fm. Huayacocotla				
PALEOZOICO	PERMICO		Fm. Huizachal				
			Rocas igneas intrusivas y metamorfias (Macizo de Teziutlà)	Esquistos		Secuencia metamorfica Xiucar (Esquistos y Pat-Met. Rocas Igneas Intrusivas)	

1. Yánez, García (1980)
2. Viniegra Osorio (1965)
3. Segura, Delgado, Zamora (1987)
4.  Hiatos o no depòsito
5.  No existe
6.  Discordancia

tabla 3.- Nomenclatura y correlaciòn de unidades presentes dentro de la Caldera Los Humeros.

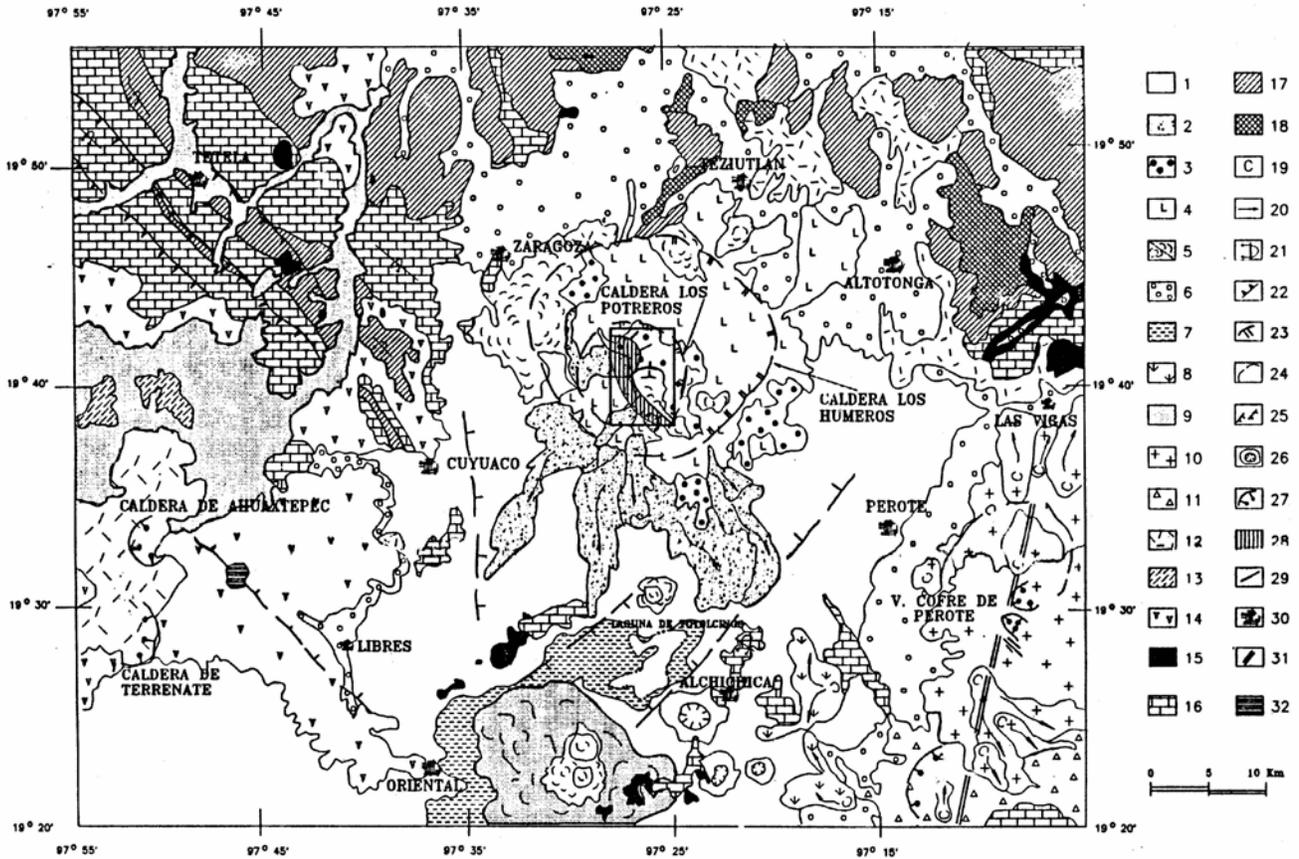


Figura 3.- Plano geológico simplificado de Los Humeros, Pue.

1) Aluvión y eluvión, 2)Dacitas y andesitas, arenas + andesitas basálticas y basaltos el limón, 3)Depósitos de pómez post-Zaragoza, 4)Andesitas, andesitas basálticas y basaltos orilla del monte + andesitas basálticas y dacitas la viola, 5)Domos y tobas rióliticas, 6)Ignimbritas Xaltipán y Zaragoza, 7)Depósitos lacustres, 8)Volcanismo básico, 9)Ignimbrita apulco, 10)Actividad del cofre de perote, 11)Andesita apanteopan, 12)Andesita teziutlán, 13)Riolita ixtacaxitlán, 14)Andesita cuyuaco, 15)Intrusivos k-t, 16)Secuencia cretácica, 17)Secuencia jurásica, 18)Basamento local (pz), 19)Centro de emisión volcánica, 20)Dirección de flujo, 21)Anticlinal recumbente, 22)Falla inversa/cabalgadura, 23)Colapso caldérico, 24)Borde Caldérico inferido, 25)Falla normal inferida con línea punteada, 26)Cráter de explosión, 27)Caldera de explosión, 28)Limite del campo geotérmico probado, 29)Dique, 30)Población, 31)Lineamiento regional, 32)Zona de alteración hidrotermal.

## **Basamento local**

Esta unidad consiste de una secuencia de rocas de composición que varía de granítica a granodiorítica, así como de esquistos de muscovita y cuarzo, que afloran en la sierra de Chignautla y la margen izquierda del río Bobos. Se fecharon edades, utilizando el método K-Ar, de  $246 \pm 7$  Ma (Pérmico Tardío) y  $181 \pm 5$  Ma. (Triásico Tardío-Jurásico Temprano, Yáñez, 1980), en las rocas metamórficas que aparecen en las márgenes de la presa de La Soledad, ubicada al NW de Teziutlán (tabla 3). En lo que respecta a las rocas ígneas fueron datadas en  $207 \pm 7$  Ma., lo que indica la última etapa de la actividad plutónica.

## **Secuencia jurásica**

Durante el Jurásico se depositó, de manera discordante sobre el basamento, esta secuencia compuesta por lutitas intercaladas con areniscas y calizas, con presencia de algunas lentes de conglomerados, que representan una zona de transición de depósitos continentales a marinos (Formación Huayacocotla). Debido a fluctuaciones en el nivel del mar, se originó el depósito de areniscas intercaladas con lutitas y conglomerados (Fm. Cahuwasas).

Durante el Jurásico Superior predominó un ambiente subacuoso que dio lugar al depósito de lutitas negras carbonosas (Fm. Santiago), con un cambio a materiales más carbonatados (Formaciones San Pedro, Tamán y Pimienta)

Estas secuencias afloran principalmente al norte del campo, en la sierra del río Apulco, al W y E de Tlatlauquitepec y en la sierra de Altotonga (tabla 3).

## **Secuencia cretácica**

Está representada por calizas cristalinas con lentes de pedernal de la Fm. Tamaulipas Inferior y calizas arcillosas de estratificación media a delgada con bandas de pedernal negro (Fm. Tamaulipas Superior), las cuales presentan un cambio de facies a calizas arrecifales (Fm. Orizaba); posteriormente, la sedimentación aportó más arcilla a las calizas (Formaciones San Felipe y Méndez).

Estas unidades litológicas afloran en todas las direcciones alrededor de la caldera de Los Humeros, cuyos productos eruptivos sepultaron los rasgos morfológicos, por lo que sólo sobresalen las partes calcáreas más altas al sur de la Caldera de los Humeros, Tepeyehualco. Algunos pozos geotérmicos alcanzaron estas unidades, como el H-03, H-09, H-16 y H-31, entre otros.

## **Etapa intrusiva**

A finales del Cretácico y durante el Terciario Superior acaeció la Orogenia Laramide, cuyos esfuerzos se dieron con dirección NE-SW, originando los plegamientos, fallamientos y cabalgaduras que son parte de la Sierra Madre Oriental; al término de este proceso orogénico se produjeron una serie de intrusiones de composición granodiorítica, microgranítica y sienítica, cuyas

edades fluctúan entre los 31 y 14 m.a. (Yáñez, 1980) y que dieron lugar a un metamorfismo de contacto en sus inmediaciones, representado por skarns, hornfels y mármoles. Estos intrusivos afloran al S y SE de Los Humeros, y al NE, en las áreas de Las Minas y Tatatitla, además fueron cortados en los pozos H-05, H-09, H-11, H-12, H-26, H-37, a profundidades comprendidas entre 2 200 y 2 450m y fueron clasificados como granodioritas de biotita.

### **Terciario volcánico**

Después de la intensa actividad orogénica, ocurrió un período de quietud, acompañado de erosión, que terminó en el Mioceno Medio cuando sobrevino una importante actividad volcánica, principalmente de composición andesítica, de la cual se pueden distinguir las siguientes unidades:

Andesita Cuyuaco constituida por una serie de derrames cuyos centros de emisión no son evidentes, de edad 10.5 Ma. (Cedillo, 1984), lo que la ubica en el Mioceno Tardío. Esta unidad se localiza al SW de Los Humeros, en las cercanías del poblado de Cuyuaco, de donde toma su nombre (tabla 3).

Riolita Ixtacamaxtitán.- Se ubica al W de la población de Cuyuaco donde aflora en un conjunto de domos sepultados por depósitos piroclásticos provenientes de la caldera de Ahuaxtepec.

Andesita Teziutlán: Está formada por una serie de derrames de andesitas, andesitas basálticas y en menor grado basaltos, que constituyen una gran meseta y que cubren a las andesitas anteriores, abarcando una gran extensión, en donde destacan los grandes centros volcánicos como el Cofre de Perote, Pico de Orizaba, Sierra Negra, Buenavista, etc.; su color predominante es gris oscuro a negro, de textura porfídica en una matriz microlítica; las andesitas y andesitas basálticas se caracterizan por la presencia de fenocristales de plagioclasa (labradorita) y un alto contenido de augita, observándose también hiperstena y algo de olivino; en los basaltos los fenocristales son exclusivamente de olivino y magnetita y presentan vacuolas, esta unidad se dató por K-Ar, de una muestra entera que corresponde a una andesita porfídica de augita procedente de un afloramiento en el poblado de Juan Marcos, 10 Km al SE de Altotonga, dio una edad de 5 Ma., correspondiente al Plioceno Medio (Ruiz-Sainz, 1965), que marca el inicio de la caldera de Los Humeros. Así mismo se obtuvo una edad de 3.4 Ma, para las andesitas cercanas al puente de la entrada de Teziutlán y cubiertas por las Ignimbritas Xaltipán.(tabla 3).

### **Plio-Cuaternario**

En este tiempo se distingue la actividad del Cofre de Perote, así como la emisión de pómez conocida como unidad Atlizyaca, así mismo se identificaron otras unidades que se formaron durante este tiempo geológico, como la Ignimbrita Apulco que proviene de la caldera de Ahuaxtepec y, al mismo tiempo, empieza un vulcanismo básico principalmente al SE de Los Humeros, representado por una serie de conos monogenéticos de composición basáltica. En tiempos recientes, antes de iniciarse la actividad de la caldera de Los Humeros, se dieron depósitos

lacustres intercalados con productos piroclásticos provenientes de los centros eruptivos circundantes.

La actividad eruptiva de la caldera de Los Humeros consistió de material silíceo, cuyo evento más importante sucedió hace 0.46 Ma, con la emisión de la Ignimbrita Xaltipán y Zaragoza; esta última contiene abundante pómez de composición riolítica, obsidiana y fragmentos de riolita, y en la región de Xaltipán, de donde se tomó el nombre Ignimbrita Xaltipán, se la observa de soldada a poco soldada, de una coloración rosado muy claro, hasta muy soldada donde la coloración rosada es más intensa.

La distribución de la Ignimbrita Xaltipán es bastante amplia ya que rodea la caldera de Los Humeros y su emisión fue acompañada con el colapso de Los Humeros cuyo diámetro es de 21 km; después de este evento hubo el emplazamiento de una serie de domos riolíticos en las fracturas anulares, acompañados por una toba de caída libre, cuya edad se calculó en 0.24 m.a. Y estas pueden observarse al W del La Caldera, en lo que es el domo de Oyameles.

En cambio la emisión de la Ignimbrita Zaragoza está contenida dentro del colapso de Los Potreros, de 10 km de diámetro, evento que ocurrió después de la formación de los domos y tobas.

Una vez terminada esta actividad ácida, se dio una serie de eventos volcánicos que dieron origen a derrames de composición andesítica, andesita basáltica, basaltos y dacitas que, de manera general, se agruparon en varios miembros:

Miembro Orilla del Monte, constituida por una serie de derrames muy fluidos que se extienden por un poco más de una decena de kilómetros, debido a que en parte aprovecharon la pendiente externa del colapso de los Humeros que consiste en una serie de derrames de rocas porfídicas de color gris claro, con fenocristales de plagioclasa y augita con escaso olivino. Las andesitas tipo afloran en el extremo noreste de La Caldera, en las cercanías del poblado de Xaltipán

Miembro La Viola, estas tienen la misma composición que las del Miembro Orilla del Monte y varía entre andesitas y basálticas son rocas grises oscuras que corresponden a diferentes eventos volcánicos del volcán San Antonio clasificada como una Dacita vitrofídica. con fenocristales de augita y andesina, clasificadas como andesitas. Estas rocas representan el final de la actividad volcánica, porque coronan los centros emisores que dieron origen a las rocas del miembro orilla del Monte.

Miembro San Antonio constituido por una serie de derrames de composición andesita y basáltica de origen postcaldérico que se halla únicamente dentro de La Caldera de Los Humeros. Están representados por varios centros emisores emplazados alrededor del anillo central interno, y el cual el más importante es el volcán San Antonio (Hilillo).

Existen también una serie de derrames escoriáceos de basaltos y andesitas, acompañados de flujos piroclásticos de la misma composición. Los aparatos

volcánicos que los originaron se emplazan de manera preferencial sobre la zona de falla del colapso de Los Humeros (tabla 3), cuyo borde está cubierto por estos materiales y se puede inferir por el alineamiento de los aparatos volcánicos.

Después de la evacuación de la mayor parte de las lavas descritas, se produjo la erupción de pómez de composición riódacítica, que cubrió los rasgos anteriores y se localiza al E y SE del colapso central.

Sobre el borde sur del colapso de Los Humeros se formó un arco de conos de escoria, así como una serie de derrames tipo aa, que se extienden por más de 15 km, los cuales fueron agrupados en dos miembros: El Limón y Tepeyahualco, que son andesitas con escasos fenocristales de plagioclasa sódico-cálcicas, y basaltos de olivino y plagioclasa calcica, de coloración gris oscura a negra; sobre el borde sur se presentan conos de escoria y derrames de coladas de menores dimensiones de composición andesítica, cuyo color predominante es negro.

### **Geología estructural**

Con la litología descrita de los 40 pozos perforados hasta el momento se determinó la geología y la secuencia litológica, contenida en las tabla 3 y figura 4, que muestran el comportamiento de las 9 unidades geológicas del campo, desplazadas por fallas normales, interpretadas a partir de las secciones geológicas elaboradas.

Sección E – W. La figura 4 muestra cuatro secciones longitudinales con dirección E-W, observándose que el basamento es más superficial hacia el poniente y está asociado al flanco oriental de un anticlinal, como lo confirman los pozos H-22, H-05, H-02 y H-14. Los grandes desniveles del basamento y de los contactos litológicos de la serie volcánica (Andesitas de augita, Toba vítrea, Andesitas de hornblenda y Basaltos) así como la variación de espesores, permiten definir un sistema de fallas normales escalonadas hacia el centro del sistema geotérmico. Con las trazas superficiales de cada sección se elaboró el plano geológico estructural (Cedillo, 1984)

Sección N – S. Las cuatro secciones geológicas estructurales de la figura 5 muestran, una depresión estructural en el sector del pozo H-20, H-11 y entre los pozos H-04 y H-10, y también entre los pozos H-07 y H-01.

Durante la perforación de los pozos H-35 y H-37 se observó la presencia de un gran salto estructural entre los pozos H-09 y H-33, lo cual hace suponer la existencia de un sistema de fallas, al cual se le puede relacionar con La Antigua. El H-37 penetró un intrusivo granítico emplazado en una zona fracturada que posiblemente está relacionada con la misma. Ambos pozos poseen buenas condiciones termodinámicas y de producción.

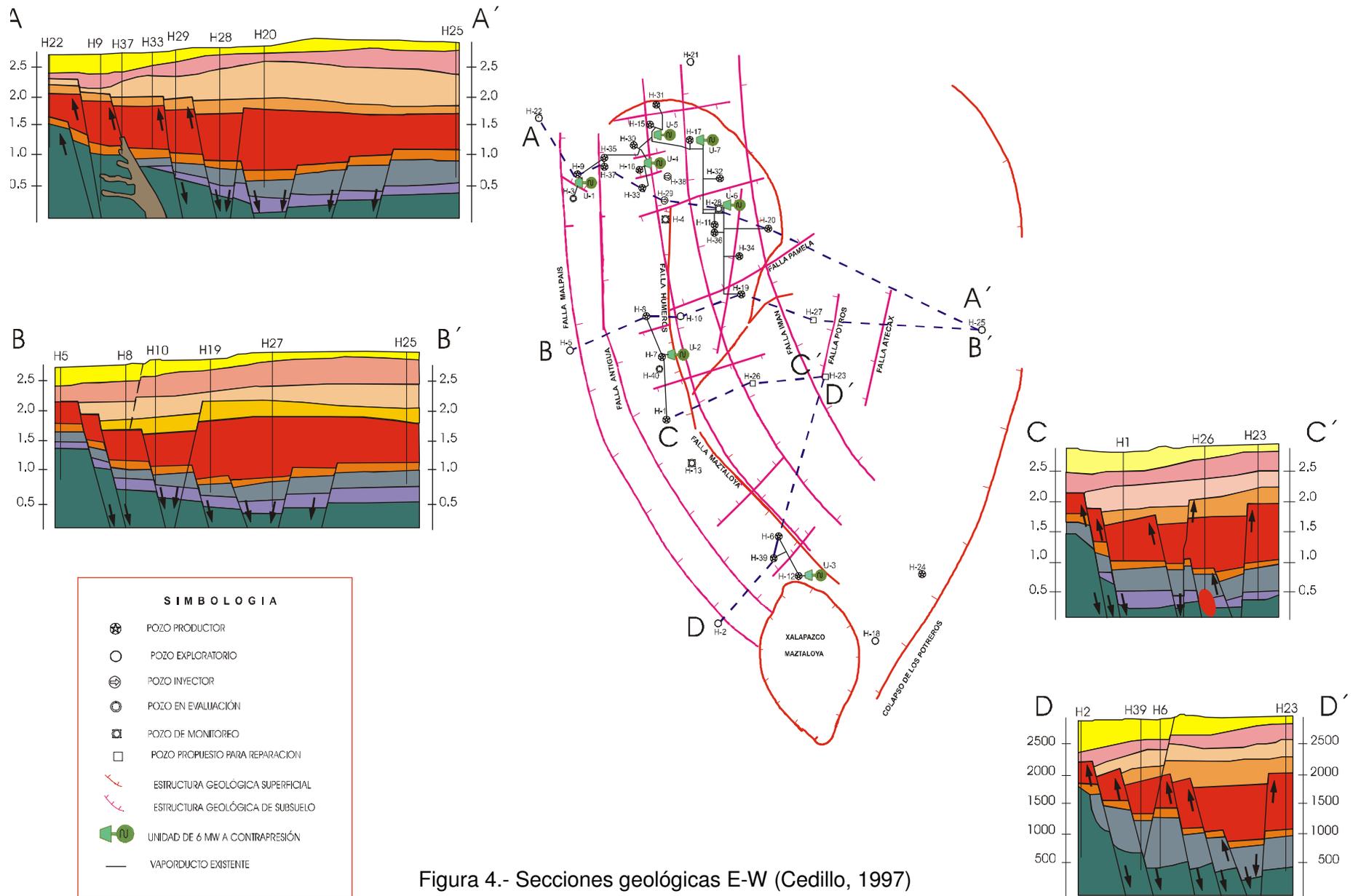


Figura 4.- Secciones geológicas E-W (Cedillo, 1997)

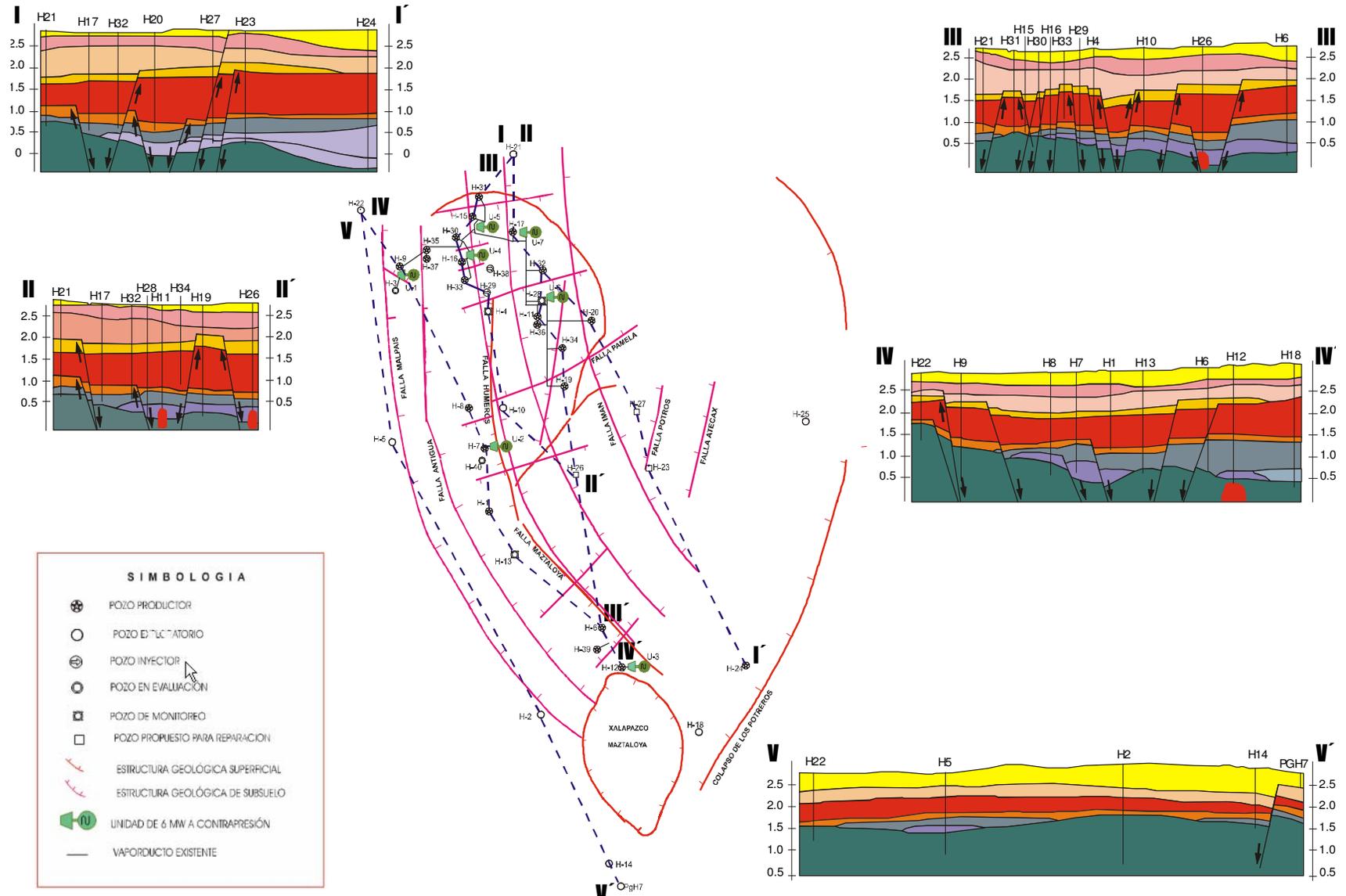


Figura 5.- Secciones Geológicas N-S, (Cedillo, 1997)

## **Geohidrología**

El campo geotérmico de Los Humeros está asociado a un complejo silíceo que, en sus inicios, presentó una serie de derrames de andesitas cubiertos por ignimbritas, que formaron los colapsos de Los Humeros y Los Potreros, acompañados por una serie de flujos de cenizas y flujos piroclásticos. Los emplazamientos de los domos riolíticos se dieron en la fractura anular y una serie de derrames de composición basáltica en la parte sur del campo culminaron la evolución de la cámara magmática que le dio origen.

Una tectónica compresional en el Cretácico produjo una serie de fallas y cabalgamientos con una orientación NE-SW; posteriormente empezó un régimen extensional que dio origen a una serie de fallas normales, y que fueron aprovechadas para el emplazamiento del complejo volcánico que dio origen a la caldera de Los Humeros durante el Pleistoceno.

Estudios de geología estructural han determinado una fase de deformación durante el Pleistoceno Tardío, debido a una serie de intrusiones magmáticas, con las que está relacionada la actividad geotérmica.

El área que actualmente está en explotación por parte de Comisión Federal de Electricidad, se encuentra dentro del colapso de Los Humeros; un sistema complejo de fallas y fracturas, consideradas como barreras estructurales, delimita lo que es en sí el yacimiento; al norte y este se trata de un rasgo topográfico del "Colapso Central"; hacia el sureste es la traza de la falla Humeros-Maztaloya y el xalapasco Maztaloya, mientras que hacia el W- SW es un sistema de fallas ocultas que constituyen la falla Antigua, puesta en evidencia con la ayuda de los registros litológicos de pozos y métodos geofísicos. Fuera de esta área de producción los pozos perforados resultaron improductivos.

Dentro de esta misma existen pequeñas subcuencas hidrográficas en la que la red de drenaje es concéntrica la cuál tiene estrecha relación con los colapsos, este mismo ha influido en la densidad y longitud de corrientes, ya que por el intenso fracturamiento generado durante los diferentes episodios geológicos y materiales que lo conforman, la permeabilidad es alta, razón por la cual los cauces son de reducida longitud y poco abundantes, tomando en cuenta las características geológicas locales, se pueden diferenciar ocho unidades, las cuales los elementos que se tomaron para considerarlos como unidades geohidrológicas se describen en la tabla 4,

### **Unidad I (Andesitas)**

Esta unidad se observa en los puntos muestreados al norte de la caldera de Los Humeros, como una serie de derrames altamente fracturados de textura afanítica y fenocristales de plagioclasa, cuya coloración varía de gris oscuro a gris claro; se puede describir perfectamente en el punto de muestreo denominado Atoluca, en donde se encuentra un manantial. De acuerdo con sus características, distribución y posición topográfica es posible catalogarla como una unidad

receptora del agua pluvial, que se localiza desde Teziutlán hasta el este de Xiutetelco.

### **Unidad II (Andesitas basálticas, basaltos, tobas e Ignimbritas)**

Se trata de una unidad litológica que se observa hacia el oriente del campo, en la cual se localizan gran parte de los manantiales; es una serie de secuencias volcánicas compuestas de andesitas basálticas, basaltos, tobas e ignimbritas, que favorecen la captación de agua pluvial; la mayoría de estos ojos de agua afloran en barrancas, desplazándose principalmente en la toba, a excepción del manantial del Tesoro, ubicado al noroeste de caldera de Los Humeros, dentro de la reserva de la biósfera de Pancho Pozas, y que aflora en basaltos, altamente fracturados.

### **Unidad III (Riolitas e ignimbritas)**

Esta unidad se localiza al W del campo, aflorando principalmente en el camino que conduce a los poblados de Oyameles, Xaltipán, y Zaragoza. La ignimbrita posee una textura vítrea, y un color que varía de rosa oscuro a claro; además se aprecia una toba lítica y vítrea que va de color a rosa fuerte a bajo, con una notable presencia de obsidiana y esferulitas. En la comunidad de Huitzilapan existe un pozo perforo esta unidad.

### **Unidad IV (Flujos piroclásticos)**

Los fragmentos que corresponden a la Unidad IV son de una gran variedad de tamaños y colores, que se pueden agrupar en varias formas: tobas poco consolidadas, lahares, flujos piroclásticos y derrames basálticos, cuya heterogeneidad y poca consolidación ofrecen excelentes condiciones de permeabilidad: De ella actualmente se extrae agua para riego y abastecimiento de las poblaciones cercanas como Perote y Frijol Colorado.

### **Unidad V (Aluvión)**

Está constituida por materiales de tipo aluvial y sedimentos lacustres, constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas, mezclados de manera heterogénea, lo que permite la recarga vertical. En esta unidad se ubican los pozos del área del Cerro Pizarro y El Cisne, en los poblados de Tepeyehualco y San Miguel el Pizarro, los cuales los niveles freáticos se encuentran muy someros del orden de 7 y 9 m respectivamente.

### **Unidad VI**

Se localiza dentro de la caldera de Los Humeros y está compuesta principalmente por tobas de caída libre y una serie de derrames de basaltos y andesitas poco consolidadas, en la cual se localiza el líquido a profundidades del orden de los 200 a 300 m.

## Unidad VII

También se localiza dentro de la caldera de Los Humeros, dentro de un paquete de andesitas porfídicas y macrocristalinas, con un espesor de aproximadamente 1500 m. lo que la hace diferente de la unidad I, es la presencia del yacimiento geotérmico..

## Unidad VIII

Esta unidad aparece en calizas jurásicas y cretácicas, tratándose de un acuífero profundo, que posiblemente se mueva a través de fracturas, ya que su permeabilidad es muy baja. En la zona no existen pozos que la hayan tocado, a excepción de algunos perforados por CFE dentro de la caldera y, aunque en los alrededores hay afloramientos de calizas, la mayoría de los pozos que se utilizan para la extracción de agua potable la producen por encima de ella.

Para fines del presente trabajo, las unidades de interés son las unidades VI y VII, ya que es donde se encuentra alojado el yacimiento que actualmente esta en explotación. Estos sistemas fueron el resultado de la interpretación de registros de presión y temperatura, así como estudios de geoquímica y geología de los pozos perforados, resultados que comprueban la existencia de dos acuíferos dentro de la estructura de Los Humeros. El yacimiento está alojado en el paquete de andesitas de donde actualmente se extrae el fluido geotérmico.

UNIDAD GEIHIROLOGICA	DESCRIPCION	UNIDAD LITOLOGICA	LITOLOGIA	PERMEABILIDAD	CARACTERISTICAS DE LA ROCA	HIDROGEOLOGIA
<b>I</b>	Andesitas (Fuera de la caldera de Los Humeros)	4	Andesita de Augita	Media	alto fracturamiento y baja porosidad	Semiconfinado
		5	Toba Vitrea			
		6	Andesita de Hornblenda			
<b>II</b>	Andesitas basálticas, basaltos, tobas e Ignimbritas	1	Pomez, Basaltos y Andesitas	Alta	Baja porosidad	Semiconfinado
		2	Toba Litica			
		3	Ignimbrita			
<b>III</b>	Riolitas e Ignimbritas	3	Ignimbrita	Baja	Baja porosidad	Somero o colgado
		9	Riolitas			
<b>IV</b>	Flujos Piroclasticos	1	Pomez, Basaltos y Andesitas	Alta	Alta Porosidad	Semiconfinado
<b>V</b>	Aluviòn	12	Aliviòn	Alta	Porosidad Alto	Semiconfinado
<b>VI</b>	Tobas de Caida Libre, derrames basálticos y andesitas poco consolidadas	1	Pomez, Basaltos y Andesitas	Alta	Alta porosidad y alto fracturamiento	Semiconfinado
<b>VII</b>	Andesitas de augita (Superior), y Andesitaas de Hornblenda (Inferior), toba vitrea y basaltos en la base	4	Andesita de Augita	Media	Baja porosidad y Fracturamiento alto	Confinado
		5	Toba Vitrea	Baja		
		6	Andesita de Hornblenda	Media		
		7	Basaltos	Media		
<b>VIII</b>	Calizas Jurasicas, ccretacicas, metamorfismo de contacto e intrusivos, Bassamento local	8	Calizas	Baja	Alto fracturamiento y disolución	Semiconfinado
		10	Intrusivos	Baja		

Tabla 4.- Unidades geohidrologicas, (Jiménez S. E., 2004)

## **Geofísica**

El modelo geológico estructural del sistema geotérmico de Los Humeros se sustenta en la existencia de los colapsos de Los Humeros y Potreros, para lo cual se realizó una reinterpretación de las bases de datos geofísicos, en particular la anomalía de Bouguer, el campo magnético total, la resistividad y las temperaturas estabilizadas.

Los colapsos definen un sistema de fallas de comportamiento concéntrico que dan lugar a una depresión. Las interpretaciones de estudios geofísicos (magnetometría, gravimetría y resistividad), determinan al E un confinamiento del hidrotermalismo y que al W se complementa con otro sistema de fallas (Antigua y Malpais)

El área de hidrotermalismo más importante y que presenta rasgos en superficie es la Falla Humeros, de la cual se interpretaron las zonas de mayor actividad, tanto en el bloque alto como bajo, asociadas indudablemente a zonas de fractura o fallas transversales

Se detectó un mínimo gravimétrico relacionados con una depresión, el cual está limitado en sus porciones norte y oriente por máximos gravimétricos, mientras que en los sectores poniente y sur está flanqueado por un máximo relacionado con un alto estructural (anticlinal). Posteriormente, las interpretaciones gravimétricas trazan las posibles fallas Malpais y Antigua, que perturban al flanco oriental del anticlinal, es decir, las fallas desplazan sólo al basamento calcáreo metamorfoseado.

Con la reinterpretación de los datos de gravimetría, resistividad y magnetometría se sabe que las fallas descritas son escasas en superficie, pues la mayoría tiene su expresión en el subsuelo; estas fallas no manifiestan una traza continua escalonada con caída al este, como se señala en los informes de los modelos geológicos anteriores. Estas evidencias no confirman la existencia de una falla individual, sino que mas bien indican que se trata de una consecución de varias fallas que siguen una misma orientación; asimismo, los lineamientos que corresponden a la traza de los colapsos de Los Humeros y Potrero no tienen una forma circular, pero se trata de un alineamiento N-S que afecta a rocas producto de los colapsos, los que sirven de fronteras que han sido detectadas con los diferentes métodos geofísicos.

## **Geoquímica**

De acuerdo con sus características geoquímicas, el agua que se produce en el campo se clasifica como de baja salinidad y de tipo bicarbonatado sódico, debido a que proviene de la parte somera del yacimiento, excepto la que generan los pozos H-16, H-07, H-11 y H-06 que es del tipo clorurado sódica, esta agua es producida en la parte profunda, por lo que no ha alcanzado un equilibrio químico como se observa en la figura 6. Por otro lado, un gran problema que presenta la

mayoría de los pozos productores es la saturación de sílice, que da lugar a incrustación en la tubería, lo que dificulta las medidas que se requieren a la profundidad deseada.

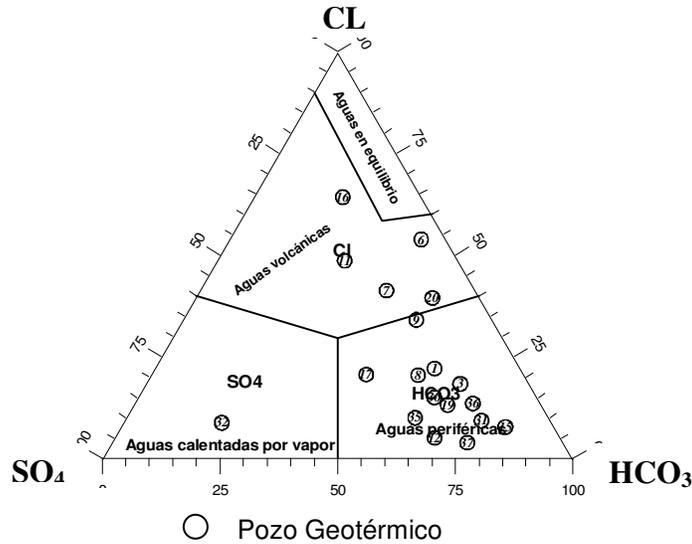


Figura 6.- Contenido relativo de cloruros – sulfatos y bicarbonatos del año 2004, (López, R. O., 2004)

El yacimiento de Los Humeros presenta una acides el cual se origina con el transporte de fluidos generados en reciente actividad volcánica, el vapor supercalentado (< 300 °C), llevan un alto contenido de HCL donde estos fluidos son neutralizados al hacer contacto con feldspatos y micas, ya que las concentraciones de HCL y HF han sido detectadas el vapor ya que la presencia de boro y arsénico sin indicios de vulcanismo reciente.

#### IV Características del yacimiento

De los estudios realizados en el campo geotérmico Los Humeros se ha observado que en la zona norte existen condiciones más favorables para la extracción de fluidos, debido a que el contenido de gas es menor en este sector, además de contar con pozos que tienen buena producción de vapor a 10 bares, como por ejemplo los H-9, H-35, H-7, H-31, H-15 y H-37. Por otra parte, estos pozos presentaron condiciones adecuadas de temperatura de equilibrio durante la perforación y su presión es favorable para continuar con el proceso de generación, lo que se puede ver favorecido por la existencia de un sistema escalonado de fallas que podrían facilitar el ascenso de los fluidos.

El yacimiento geotérmico está alojado en rocas volcánicas pertenecientes a una caldera, ubicada entre los límites de las provincias del EVT y la SMO. Las dos zonas productoras del yacimiento que se han venido explotando se encuentran entre los 1 300 y 2 000 metros de profundidad, las cuales han sido identificadas por registros de presión y temperatura, pérdidas de circulación, parámetros geoquímicos y geológicos.

La primera zona productora se encuentra en las andesitas de augita y la inferior en las andesitas de hornblenda, separadas por una toba vítrea y una zona de silicificación, presentándose fluidos ácidos en algunos pozos terminados en andesitas de hornblenda y basaltos. Ambas zonas presentan características diferentes, tanto químicas como termodinámicas. La zona superior tiene pH neutro y temperaturas del orden de 282 °C, con presiones de 120 bares. La inferior tiene altas temperaturas entre 300 y 330 ° C, con 150 bares y en el yacimiento profundo de la zona norte del campo se presenta un pH ácido. Con el propósito de observar el comportamiento de la presión del yacimiento durante la explotación del campo, se han instalado en periodos determinados, equipos de monitoreo en pozos que no están integrados al sistema de generación (H-06, H-10, H-13, H-28, H-33, H-39 y H-40).

En el caso del pozo H-10 se instaló el equipo de monitoreo a una profundidad de 1 520 m, registrando la presión en el período comprendido entre septiembre de 1994 a junio de 1995, observándose una declinación de la presión del pozo de 0,47 bar/año. Cabe señalar, que este pozo está en los límites de la zona de explotación del campo.

En el pozo H-13 se observó la presión a una profundidad de 1 100 m, donde se encuentra el primer intervalo permeable, del 1º de octubre de 1997 hasta la fecha, notándose un ligero abatimiento de la presión, del orden de 0,34 bar/año.

En el pozo H-28 se monitoreó la presión a 800 m de profundidad, desde el 4 de octubre de 1997 hasta el 1 de septiembre de 2000 y durante este periodo se obtuvo un incremento de la presión del orden de 1.5 bar/año.

En el H-33 se monitoreó la presión desde el 20 de noviembre de 1999 a la fecha, a una profundidad de 1 100 metros y al ver el comportamiento de este parámetro en los intervalos donde la información es continua (2 periodos) se determinó una caída de la presión de 2 bares/año.

En el pozo H-40 se instaló una cámara pruet a la profundidad de 1 700 metros por un período de dos años (Febrero de 1999 a febrero de 2001), observándose un decremento de 0.2 bar/año hasta el 15 de septiembre de 2000 que inició un declinar rápido (2 bar, en el periodo de 151 días, equivalente a 4.78 bar/año) hasta que fue retirada, ya que no es claro su comportamiento.

Así mismo fue instalada una cámara pruet en los pozos H-6 y H-39 a 1500 y 1 300 m del 17 al 31 de julio del 2001 y del 26 de junio de 2001 al 7 de agosto del 2002, respectivamente, notando un incremento de 5.8 bares.

Como se vio, en algunos pozos se presentaron decremento e incremento, lo cual hace difícil afirmar de una manera contundente que exista un abatimiento de la presión del yacimiento. Sin embargo el H-33, que está más ligado a la zona de explotación continua, presenta intervalos que muestran decrementos considerables (Del 15 de enero de 2002 al 21 de marzo de 2003, de 4.2 bares/año y del 5 de mayo de 2003/05/03 al 12 de enero de 2004 de 6.4 bares /año).

Por el comportamiento observado de la presión de los pozos se puede pronosticar el abatimiento promedio del campo es de 0,4 bar/año.

El análisis de la declinación de la producción se realizó utilizando pozos que se encuentran integrados al sistema de generación (H-03, H-06, H-07, H-08, H-09, H-11, H-15, H-16, H-17, H-19, H-20, H-30, H-31, H-32, H-35 y H-37), obteniendo los siguientes resultados:

Después del análisis de la zona norte se encontró que los pozos: H-03, H-09, H-11, H-15, H-16, H-19, H-35 y H-37, presentan un incremento global de 1.3 t/año y los pozos H-07, H-08, H-15, H-17, H-20, H-30, H-31 y H-32 presentaron decremento 1.36 t/año, por lo que en global el predominio del decremento es mínimo.

El análisis de la zona sur muestra que el H-06 presentó un decremento considerable de 5.4 t/año y el H-12 no tiene mediciones directas al estar integrado y el H-39 tiene poco tiempo que se integró. Por otra parte, las curvas características del H-06, muestran que se presentó un incremento considerable del 2001 al 2005, tanto en la presión del cabezal (10 bares) como en el flujo de vapor (12.25 t/h) por el orificio más grande que fue medido (63.5 mm; 2.5"), lo cual puede atribuirse a que el pozo estuvo purgado desde mayo del 2000 hasta enero del 2003 y sólo se abrió en el 2001 para evaluarlo. Lo cual se contrapone a lo expuesto en el párrafo anterior, ya que esta integrado y no ha presentado disminución del flujo.

## **V Modelo conceptual del campo**

El modelo geotérmico del área de Los Humeros considera un sistema hidrotermal convectivo, donde las fallas regionales que formaron el graben Libres – Oriental y las zonas de fractura asociadas permiten el movimiento de las aguas meteóricas que se originan en las tierras altas de los alrededores del campo. El sistema estructural asociado con la actividad volcánica cuaternaria, que formó la caldera de Los Potreros, permite una recarga vertical local y las intrusiones dacíticas /riodacíticas proporcionan una fuente local de calor. (anexo 2).

### **Yacimiento geotérmico (estructura geológica)**

La información de geología, geofísica, geoquímica y de perforación se integra para representar las características que controlan el sistema geotérmico de Los Humeros. Los datos de geología superficial, de litología y mineralogía de los pozos, pérdidas de circulación del fluido de perforación, información de gravimetría y las discontinuidades eléctricas, se utilizan para interpretar la relación entre la estructura geológica profunda y el movimiento de los fluidos geotérmicos.

El yacimiento está contenido en andesitas del Eje Volcánico Transmexicano (EVT), que funcionan como acuífero gracias a la permeabilidad que le dan las brechas intraderrames y las fallas y fracturas que la disecan. Estas rocas tienen una edad Mioceno – Plioceno (11 - 5- 3,5 m.a.), con espesores que van de 400 a

2000 m (Andesitas de augita-horizonte de toba vítrea- Andesita de hornblenda). Las temperaturas en la formación son cercanas a los 300 °C, como lo corrobora la zona de alteración hidrotermal Epidota-Anfíbol. Estas rocas cubren a calizas arcillosas cretácicas, plegadas por la Orogenia Laramide y fracturadas por la tectónica del EVT, con escasa permeabilidad y temperaturas medidas del orden de los 400 °C. Las andesitas del yacimiento están cubiertas por los productos de la Ignimbrita Xaltipán, con espesores que van de 190 – 900 m y que funcionan como la roca sello, además del autosellamiento provocado por la zona de cuarzo-calcita-clorita en estas rocas.

La extensión del campo geotérmico es de 36.9 km<sup>2</sup>. El espesor medio de las andesitas que contienen el acuífero geotérmico es de 1 000 m. Se estima un volumen del yacimiento de 36.9 km<sup>3</sup>.

La extensión en superficie de las zonas de alteración y las discontinuidades eléctricas derivadas del análisis geofísico tienen una dirección paralela al sistema de fallas NS y EW, las cuales conforman dentro de la geología regional la red estructural que deforma el basamento sedimentario de la región. Las zonas de mayor explotación del yacimiento geotérmico se localizan a lo largo de estos sistemas, considerados como los conductos de ascenso de los fluidos profundos de alta temperatura.

### **Recurso del calor**

El campo geotérmico Los Humeros está asociado a la actividad volcánica cuaternaria del EVT. Inicialmente, el recurso del calor proviene de la intrusión de una cámara magmática en el basamento local de tipo sedimentario, dando origen a eventos volcánicos recientes que conformaron la Caldera de Los Humeros. En adición, en algunos pozos el análisis mineralógico de los ripios de la barrena de perforación indica la existencia de nuevas intrusiones de magma silícico a lo largo de las fallas, formando una serie de diques de composición granítica. Es posible que estas últimas intrusiones estén relacionadas directamente con el recurso calor del sistema geotérmico actual.

### **El recurso agua subterránea**

El modelo geoquímico del campo fue reconstruido con base en la interpretación química de los fluidos del yacimiento. Dos tipos de acuíferos geotérmicos existen en el campo: Uno en la parte profunda del campo, del tipo clorurado (Cl) y el otro somero profundo, del tipo bicarbonatado (HCO<sub>3</sub>).

El acuífero del tipo Cl abarca desde las calizas hasta las andesitas de hornblenda, en su contacto con la toba vítrea ácida, que en este modelo se ha propuesto como un horizonte de silicificación, producto del autosellamiento por precipitación de minerales contenidos en los fluidos con temperaturas por encima de los 300 °C. Se infiere que el origen de los fluidos que recargan este acuífero se localiza en las montañas más altas que rodean a la sierra de Los Humeros. Básicamente se considera que es agua meteórica de circulación profunda con muy poco contenido de fluido magmático. La circulación profunda de esta agua debe ocurrir a través

del fracturamiento asociado a los sistemas de fallas que formaron el graben de Libres – Oriental.

El agua del acuífero menos profundo tiene bajo contenido del ion cloruro (Cl), pero relativamente alto de los iones bicarbonato (HCO<sub>3</sub>) y sulfato (SO<sub>4</sub>). Su origen puede inferirse en parte como una recarga local del agua de lluvia precipitada en la sierra de Los Húmeros y que percola al subsuelo a través de las fallas que formaron a la caldera del mismo nombre.

## VI Evaluación del recurso y elaboración de la propuesta

### Evaluación volumétrica

Con el propósito de cuantificar el potencial eléctrico del yacimiento del campo de Los Humeros se realizó una evaluación rápida (Evaluación volumétrica), mediante el método de descompresión gradual del sistema; para este análisis se tomaron los parámetros de la tabla 5.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Volumen total del yacimiento	36.9	km <sup>3</sup>
Temperatura inicial del sistema	290	° C
Temperatura final del sistema	212.4	° C
Presión inicial del sistema	74,4	Bar abs.
Presión final o de abandono del sistema	20	Bar abs.
Calor específico de la roca	1	kJ/kg °C
Calor específico inicial del fluido	5.42	kJ/kg °C
Calor específico final del fluido	4.57	kJ/kg °C
Densidad de la roca	2600	Kg/ m <sup>3</sup>
Porosidad promedio de la roca	7,5	%
Fracción de calor transferido de la roca al fluido	0,5	
Presión de separación	10	Bar Abs.
Consumo específico de la central	9	t/MW-h

tabla 5. Parámetros para el cálculo de la evaluación volumétrica, (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005)

El área de interés geotérmico, calculada con base en el análisis de los principales métodos geofísicos (resistividad de Occam a 1500 msnm, anomalía de Bouguer con densidad 2.2 g/cm<sup>3</sup>, campo magnético total y reducido al polo, temperaturas estabilizadas mayores de 250 °C y topografía) determinados por el Dr. Gerardo García Estrada (04/2004) es de 36.9 km<sup>2</sup>. Por otra parte, al considerar las pérdidas de circulación, información geológica, yacimientos y geoquímica obtenidos de los pozos productores e inyectores que existen en el campo hasta el momento, se determinó la existencia de dos zonas permeables: la superior, formada por andesitas de augita y la inferior, por andesitas de hornblenda, ambas con un espesor aproximado de 1 000 m. El análisis petrofísico realizado a núcleos de 23 pozos del campo dan un promedio de aproximadamente 7,5% de porosidad y una capacidad calorífica de 1 kJ/kg °C para las dos zonas andesíticas.

La temperatura de 290 °C es el resultado de promediar las temperaturas estabilizadas en el intervalo permeable de los pozos productores. La presión promedio de los mismos pozos en este intervalo, en estado estático, es de 120 bar absolutos, por lo que el fluido en el yacimiento se encuentra como líquido comprimido. Si se aplicara el método con esta presión se observaría que cae hasta el valor de saturación en un tiempo breve; toda la explotación posterior comenzaría a partir de aquí y no habrá variaciones importantes en el resultado si el análisis se inicia con la presión de saturación, que es de 74,36 bares absolutos para 290 °C. Con la información contenida en la tabla 5 y lo expuesto anteriormente, se deduce que pueden generarse 148 MW durante un período de 20 años.

El resultado obtenido con el método de descompresión gradual para las consideraciones que se asumen muestra que es factible generar más de 200 MW durante un período de explotación de 20 años. La figura 7 y 8 presenta la evolución de la presión, temperatura y entalpía contra el tiempo de explotación del yacimiento para una generación de 268 MW.

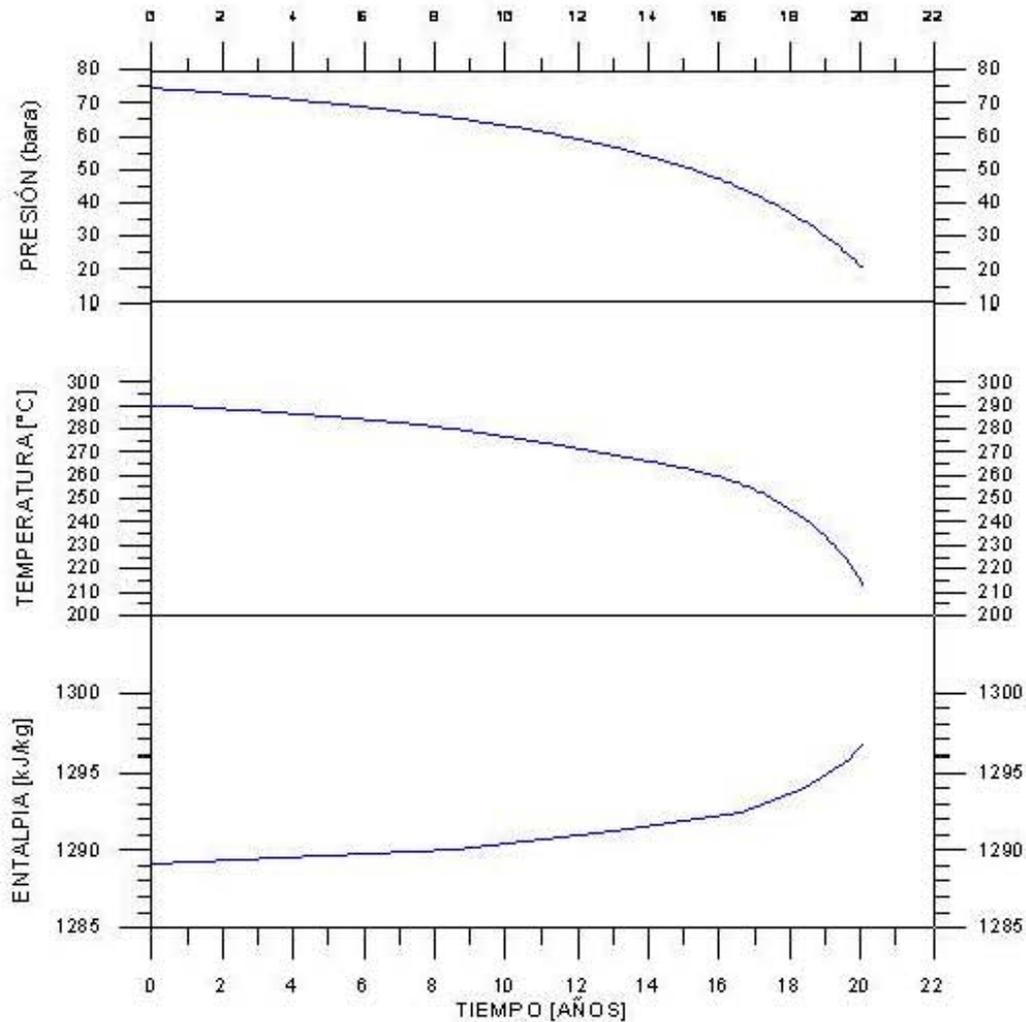


figura 7.- Evolución de la presión, temperatura y entalpía del yacimiento para una capacidad de generación de 268 MW, (C.F.E., Gerencia de proyectos geotermoeléctricos, enero 2005)

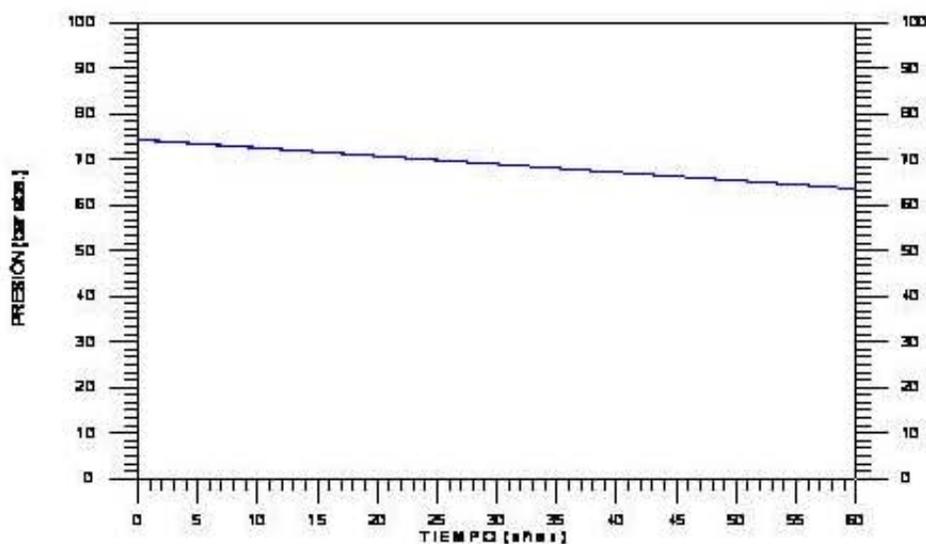


Figura 8.- Evolución de la presión del yacimiento respecto al tiempo de extracción con una potencia instalada de 35 MW., (C.F.E., Gerencia DE proyectos geotermoeléctricos, enero 2005)

### Simulación numérica

En noviembre de 1993 se recibe el documento final de la evaluación del potencial energético del yacimiento de Los Humeros, que Comisión Federal de Electricidad solicitó a la empresa Geothermal Energy New Zeland Limited (GENZEL). En este documento se analizan 3 escenarios de explotación, a saber:

- a). 7 x 5 MW (35 MW)
- b). 7 x 5 + 2 x 20 MW (75 MW)
- c). 4 x 20 MW (80 MW)

Cada escenario se simuló con y sin reinyección de toda el agua de desecho, además de los condensados. Los principales parámetros considerados para las simulaciones numéricas se muestran en la tabla 6.

PARÁMETRO	VALOR		UNIDAD
	Mín.	Máx.	
Presión	86	192	Bar
Temperatura	286	351	°C
Área total del sistema [19 x 20 Km]	380		km <sup>2</sup>
Espesor del yacimiento	1,6		Km
Volumen total del yacimiento	608		km <sup>3</sup>
Número de elementos	1 872		
Porosidad	3	5	%
Permeabilidad	0,1	1,5	mD
Densidad de la roca	2 600		kg/m <sup>3</sup>
Tiempo de explotación	25		Años

tabla 6. Parámetros considerados para las simulaciones numéricas, (C.F.E., Gerencia DE proyectos geotermoeléctricos, enero 2005)

Las unidades de 5 MW a contrapresión tienen un consumo específico de vapor de 12 t/MWh y para las unidades de 20 MW a condensación se considera de 7,5 t/MWh.

En el escenario a) no es necesario perforar pozos adicionales a los existentes, ya que hay el vapor necesario disponible en superficie. El potencial del yacimiento es suficiente para soportar la generación actual con 4 pozos de reposición durante la vida útil de las unidades. Todas las unidades a contrapresión permanecen operando durante la vida útil de las mismas.

En el escenario b) es necesario habilitar 7 pozos existentes y perforar otros 6 adicionales para iniciar la generación propuesta. Además se requerirían 7 pozos de reposición para soportar el incremento en la extracción. También todas las unidades a contrapresión permanecen operando durante su vida útil.

En el escenario c) se requiere habilitar 3 pozos existentes y perforar uno más para iniciar el proyecto, además de 5 pozos de reposición durante los 25 años de vida del proyecto. Todas las unidades a contrapresión se retiran del campo.

En cuanto a pozos inyectores, para el primer caso se requiere habilitar un nuevo pozo como inyector. En el segundo y tercero se requerirían 4 pozos inyectores nuevos.

En el año 2003, la CFE decidió actualizar la evaluación del yacimiento, mediante contrato de servicios con la empresa GeothermEx de los Estados Unidos. Esta evaluación concluye que:

a) El yacimiento es capaz de soportar la capacidad actual de 35 MW por un tiempo de por lo menos 30 años. Se estima que se requerirán por lo menos tres pozos de reposición durante ese período.

b) La evaluación indica que es posible instalar 25 MW adicionales, con plantas a condensación, en la zona norte del campo. Para ello, se necesitarán al menos 6 pozos productores adicionales al inicio y 5 pozos de reposición, durante los 30 años de vida útil del proyecto. Bajo este escenario, las 7 unidades a contrapresión permanecen operando por 30 años más, en los sitios actuales.

c) Es posible instalar hasta 35 MW adicionales en la zona norte, con plantas a condensación. En este caso, es necesario trasladar una unidad de 5 MW de la zona norte a la zona sur del campo. Al inicio se requerirán 5 pozos productores nuevos en la zona norte y 2 en la zona sur. Durante los 30 años de vida útil del proyecto, se deberán perforar, al menos, 4 pozos de reposición en el norte y 2 en el sur.

d) En los tres escenarios, los dos pozos inyectoros actuales (H-29 y H-38) son suficientes para recibir el agua separada y los condensados.

Cuando ya se tenía asignado el contrato con la empresa GeothermEx, el Japan Bank for International Cooperation firmó un convenio de cooperación con CFE para realizar una evaluación del recurso geotérmico y un estudio de factibilidad económica y financiera de ampliación de la capacidad instalada en Los Humeros, sin costo alguno para CFE. El estudio fue encomendado por el Banco a West Japan Engineering Consultans (West Jec), empresa de servicios de ingeniería subsidiaria de Kyushu Electric Power Company. Las conclusiones más importantes de dicho estudio son:

a) El yacimiento es capaz de soportar la capacidad instalada actual por otros 30 años.

b) Es viable instalar 50 MW adicionales con plantas a condensación en la zona norte del campo. Sin embargo, esto es posible sólo si permanecen operando 2 UG a contrapresión en dicha zona, en lugar de las 6 que operan actualmente.

c) En el estudio se analizan diferentes opciones de uso de las 4 UG restantes de 5 MW. Se considera el caso en que las 4 UG se reubican en la zona sur y el caso en que las 4 UG son retiradas del campo, con los casos intermedios. En todos estos escenarios el estudio considera que el yacimiento tiene la capacidad suficiente para soportar la producción del vapor requerido durante 30 años. La diferencia entre escenarios es la capacidad total instalada y el número de pozos productores requeridos, factores que inciden en el costo de la energía generada.

Por último, el estudio recomienda la instalación en cascada de UG de ciclo binario, con objeto de aprovechar el vapor de baja presión de descarga de las UG de 5 MW. Esto representaría una potencia neta adicional de 3,05 MW por cada UG. La instalación de estas UG binarias no tiene repercusión alguna en la cantidad de vapor a extraer del yacimiento, ya que utilizan vapor que ya ha sido extraído para las UG de 5 MW.

## **Capacidad de producción del vapor actual**

La explotación comercial del campo se inició en 1991 con la entrada en operación de las UG-1 y 2. En 1992 se incrementó la capacidad de generación a 20 MW con las UG 3 y 4. En 1992 entra la UG-5, en 1993 la UG-7 y en 1994 la UG-6. En general, para suministrar el vapor a las UG es necesario coleccionar la producción de 2, 3 ó 4 pozos, para lo cual se ha adecuado un sistema de ductos en la zona norte.

La producción de agua separada de todos los pozos productores es del orden de 130 t/h, debido a la baja permeabilidad del yacimiento, que favorece la producción de fluidos de alta entalpía, mediante la transferencia de calor de la roca al fluido, por lo que con la capacidad de aceptación de los pozos reinyectores actuales, es suficiente.

Por otra parte, es importante señalar que en la actualidad el agua separada y el vapor condensado (17 t/h) del sector sur (UG-3) se están reinyectando en el pozo H-13. Por otro lado, aunque no se han realizado pruebas de aceptación hasta el momento no hay problemas, en la tabla 7 se muestra un balance actual de vapor disponible del campo, y disposición de pozos y unidades generadoras del campo (plano 1 ,anexo)

Pozo	Fecha	Orificio	Q vapor	Q agua	Calidad	P cabezal
		(mm)	t/h ( 10 bar )		10 bar	bar
H-06	11/03/2005	101.6	55.2	4.8	0.9	15.9
H-12	03/03/2005	101.6	75.8	4.7	0.9	18.8
H-39*	12/10/2004	76.2	35.7	12.9	0.7	19.7
Total del sector sur			<b>166.7</b>	22.4	0.9	18.1
H-01D	04/04/2005	76.2	36.8	54.4	0.4	26.9
H-07	04/04/2005	101.6	48.4	3.0	0.9	13.0
H-08	01/04/2005	50.8	9.0	2.5	0.8	11.0
Total del sector centro			<b>94.2</b>	59.9	0.7	17.0
H-03D	03/08/2005	50.8	9.9	0.6	0.9	11.0
H-09	21/02/2002	127	48.2	3.0	0.9	11.4
H-11D	26/11/2004	50.8	12.3	0.8	0.9	11.4
H-15D	15/10/2003	76.2	37.6	2.3	0.9	17.3
H-17	12/04/2004	76.2	27.1	1.7	0.9	12.4
H-19D	29/11/2004	76.2	25.3	1.6	0.9	13.8
H-20	29/11/2004	76.2	43.3	2.7	0.9	23.4
H-30	13/06/2005	76.2	29.3	1.8	0.9	13.4
H-31	15/10/2003	76.2	43.3	2.7	0.9	20.7
H-32	12/04/2004	88.9	47.1	2.9	0.9	16.9
H-34	10/05/2005	50.8	12.0	0.7	0.9	13.1
H-35	09/07/2004	76.2	56.0	3.5	0.9	31.0
H-37	20/06/2005	76.2	29.8	7.7	0.8	17.3
Total del sector norte			<b>421.2</b>	31.9	0.9	16.4
Total del sector sur + norte			<b>682.0</b>	114.2	0.8	17.2

tabla 7. Condiciones de operación de los pozos por sector (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005)

## Propuesta

### Localización del área

El área de interés ocupa una superficie de 12,24 km<sup>2</sup> y se localiza en la porción centro oriental del estado de Puebla, en los límites con el estado de Veracruz, a 19.2 km al NW de la ciudad de Perote, Ver. a una altitud promedio de 2800 metros, entre las coordenadas UTM X<sub>1</sub>=66000, X<sub>2</sub>=665000, Y<sub>1</sub>=2169500, Y<sub>2</sub>=2180000 y Z=2170 (figura 9).

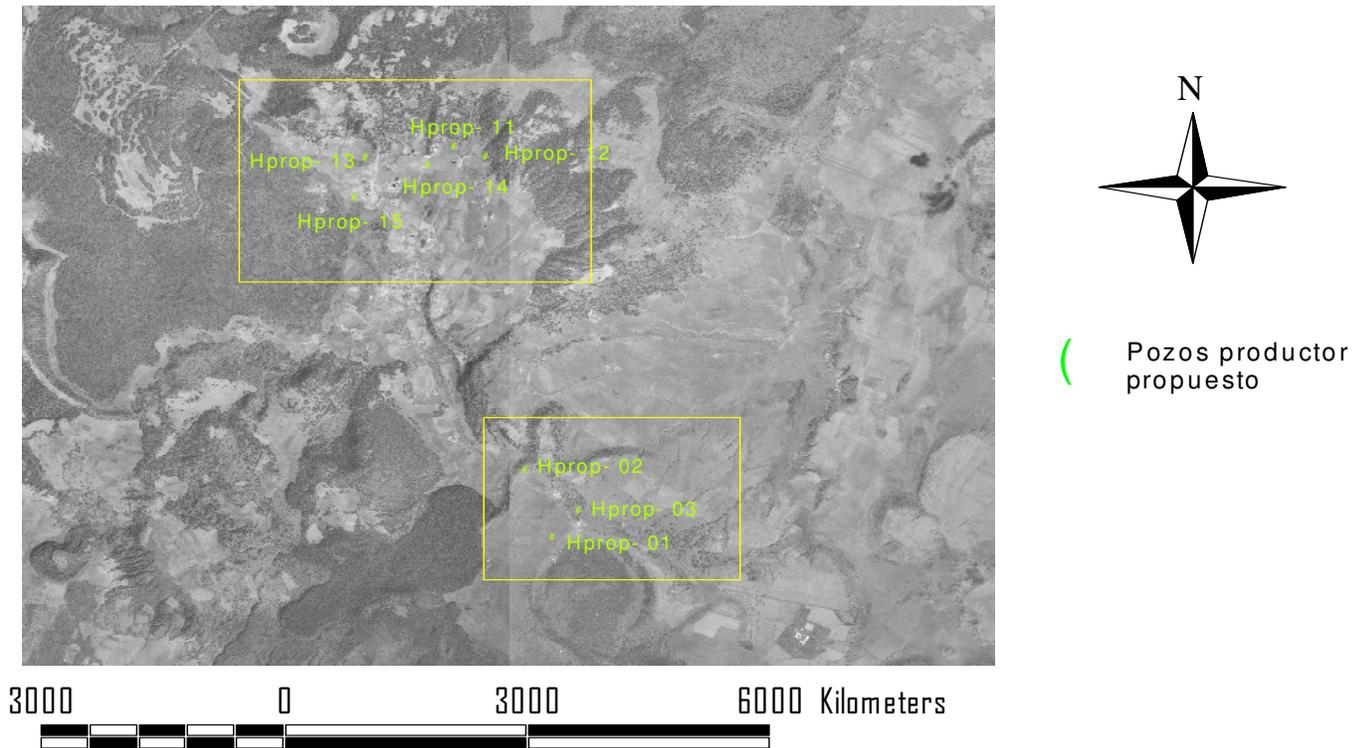


figura 9.- Ortografía procesada en Arcview, en donde se muestra el área de interés donde se propone la perforación de nuevos pozos productores

## **Método de trabajo**

Con el objetivo de complementar y fortalecer los estudios geológicos, se tomaron en cuenta el análisis de las temperaturas, presiones y gastos en las etapas de perforación, calentamiento y flujo, así como un análisis de las zonas permeables de los pozos de sector, sus características y mecanismos de producción de los sectores norte, centro y sur, los cuales alimentan a las unidades turbogeneradoras U-1, U-2, U-3, U-4, U-5, U-6 y U-7.

De acuerdo con la disponibilidad actual de vapor en estos sectores, es suficiente para satisfacer la demanda, pero considerando la declinación, para los próximos años y tomando en cuenta el funcionamiento de la unidad de 25 MW (Mega Watts), se hace necesaria la construcción de nuevos pozos para no dejar de satisfacer la necesidad de vapor geotérmico.

## **Análisis**

En el Campo de Los Humeros se ha corroborado la existencia de un gran potencial geotérmico; donde esta información ha sido confirmada con la perforación de los pozos H-06, H-12 y H-39 en la zona sur, en el sector norte lo evidencian los pozos H-09, H-35 y H-37, y en el sector central son los pozos H-07 y H-01.

Las correlaciones petrográficas apoyadas con las columnas litológicas del campo, han definido un serie de fallas ocultas, evidenciadas principalmente por el desplazamiento vertical del basamento calcáreo-metamorfizado y la variación del espesor de las andesitas de augita; donde estas fallas también han sido detectadas por los métodos geofísicos (gravimetría, geoelectrica y magnetometría), la ausencia de algunas unidades litológicas que describen los diferentes pozos del campo como los basaltos y las andesitas de hornblenda que cubren el basamento, hace pensar en la existencia de un anticlinal, combinado con fallamiento persistente, producto de la Orogenia Laramide.

La permeabilidad detectada durante la perforación y confirmada con la interpretación de los registros de temperatura y junto con los gastos de vapor, permite inferir la cercanía o intersección de estas fallas ocultas que son las portadoras de fluido geotérmico.

Los estudios de geoquímica y petrología realizados en el yacimiento han identificado que la parte profunda del recurso presenta características de un fluido ácido.

La siguiente propuesta está basada en los datos existentes del estudio y desarrollo de pozos productores, además del modelo geológico existente; con las interpolaciones de las cimas de la litología descrita en los diferentes pozos perforados dentro del campo se conformó una base de datos que contiene los espesores de las columnas litológicas, lo que permite realizar correlaciones y deducir el comportamiento estratigráfico de los pozos propuestos, cuyo objetivo principal es satisfacer la demanda de las unidades que se proponen para la

expansión del campo. Con base en estos datos de la tabla 8 se elaboraron las columnas litológicas de cada uno de los pozos propuestos como se observa en la figura 10.

### Litología

Con las correlaciones petrográficas apoyadas con columnas litológicas del campo, se puede definir la posible secuencia litológica de cada uno de los pozos a proponer, así como las posibles fallas que se pudieran interceptar, estas características se pueden apreciar en la tabla 8.

Para la zona de interés, las coordenadas de ubicación de los pozos se muestran en la tabla 9.

No.	CIMAS /msnm)							
	PBA	TL	IG	AA	TV	AH	B	C
<b>Zona Sur</b>								
Hprop- 01	2836	2605	2462	2045	1820	1390		600
Hprop- 02	2875	2540	2320	1936	1170	1080	590	410
Hprop- 03	2847	2585	2420	1970	1800	900	420	160
<b>Zona norte</b>								
Hprop- 11	2820	2775	2520	2300	1025	1007	730	710
Hprop- 12	2828	2798	2690	1911	932	830	630	470
Hprop- 13	2787	2725	2280	1910	1270	1325	930	930
Hprop- 14	2804	2705	2490	1930	1050	1020	760	570
Hprop- 15	2773	2565	2330	1930	1267	1330	970	840

tabla 8.- Cima litológicas de los pozos propuestos (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005)

PBA (Pómez, Basaltos y Andesitas), TL (Toba lítica), IG (Ignimbrita), AA (Andesita de augita), TV (Toba vítrea), AH (Andesita de hornblenda), B (Basalto) y C (Caliza).

POZO PROPUESTO	X	Y	Z
<b>Zona Sur</b>			
01	663482	2172897	2944
02	663135	2173920	2900
03	663801	2173297	2940
<b>Zona Norte</b>			
11	662269	2178853	2817
12	662664	2178699	2817
13	661176	2178695	2795
14	661950	2178560	2786
15	661039	2178081	2761

tabla 9.- Coordenadas de los pozos propuestos (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005)

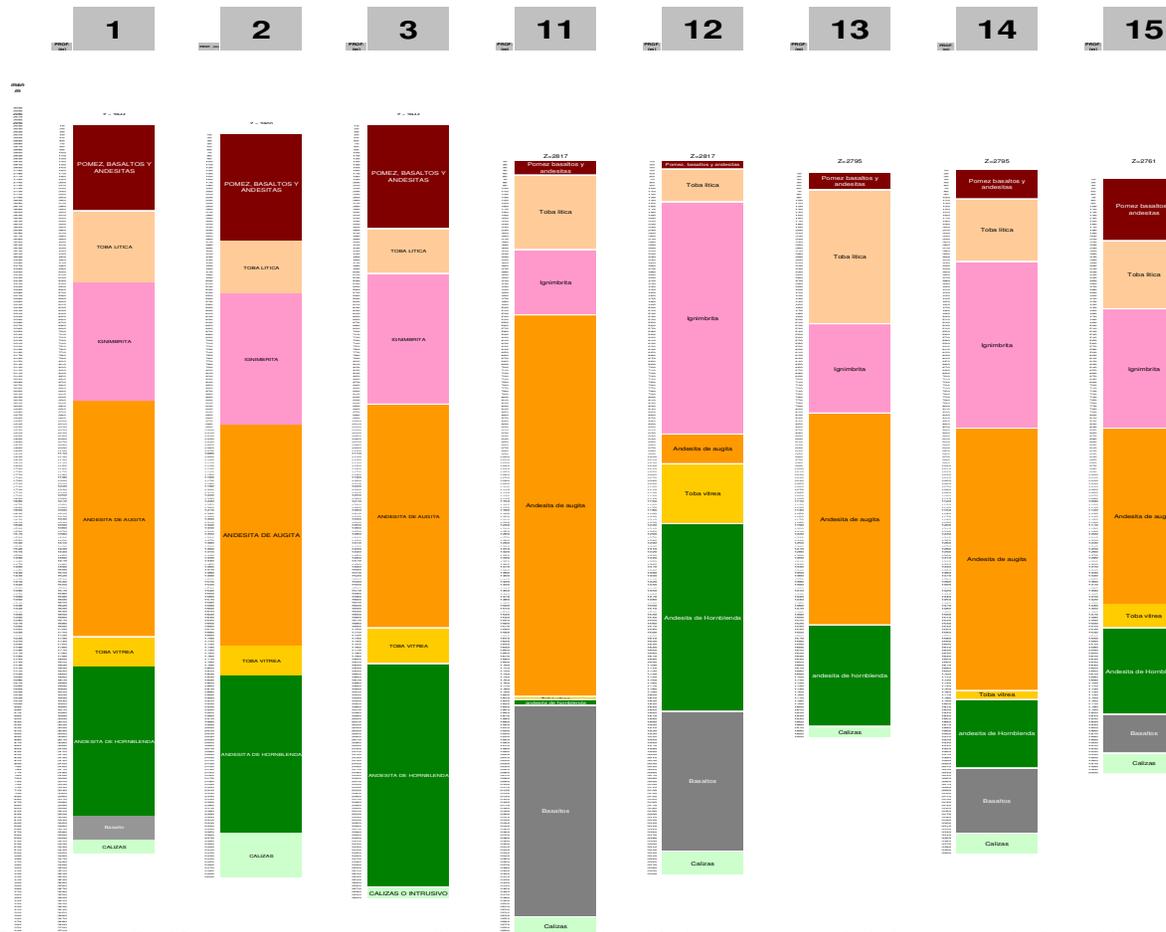


figura 10.- Columnas litológicas propuestas, (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005)

De inicio se realizaron 15 propuestas de perforación que se realizaron por parte del área de geología, 8 fueron las que tuvieron mayores posibilidades de acuerdo al análisis que se describe en este trabajo, las columnas litológicas que se mencionas corresponden a las propuestas (figura 10).

Estos mismos se infieren en secciones elaboradas en la figura 11 y 12 correlacionando la información de los pozos perforados actualmente se puede deducir un comportamiento geológico-estructural en el subsuelo, en estas se observa la sección geológica en conjunto con una propuestas de perforación, Hpro15, 11 y 12..

**Sección geológica A - A'**

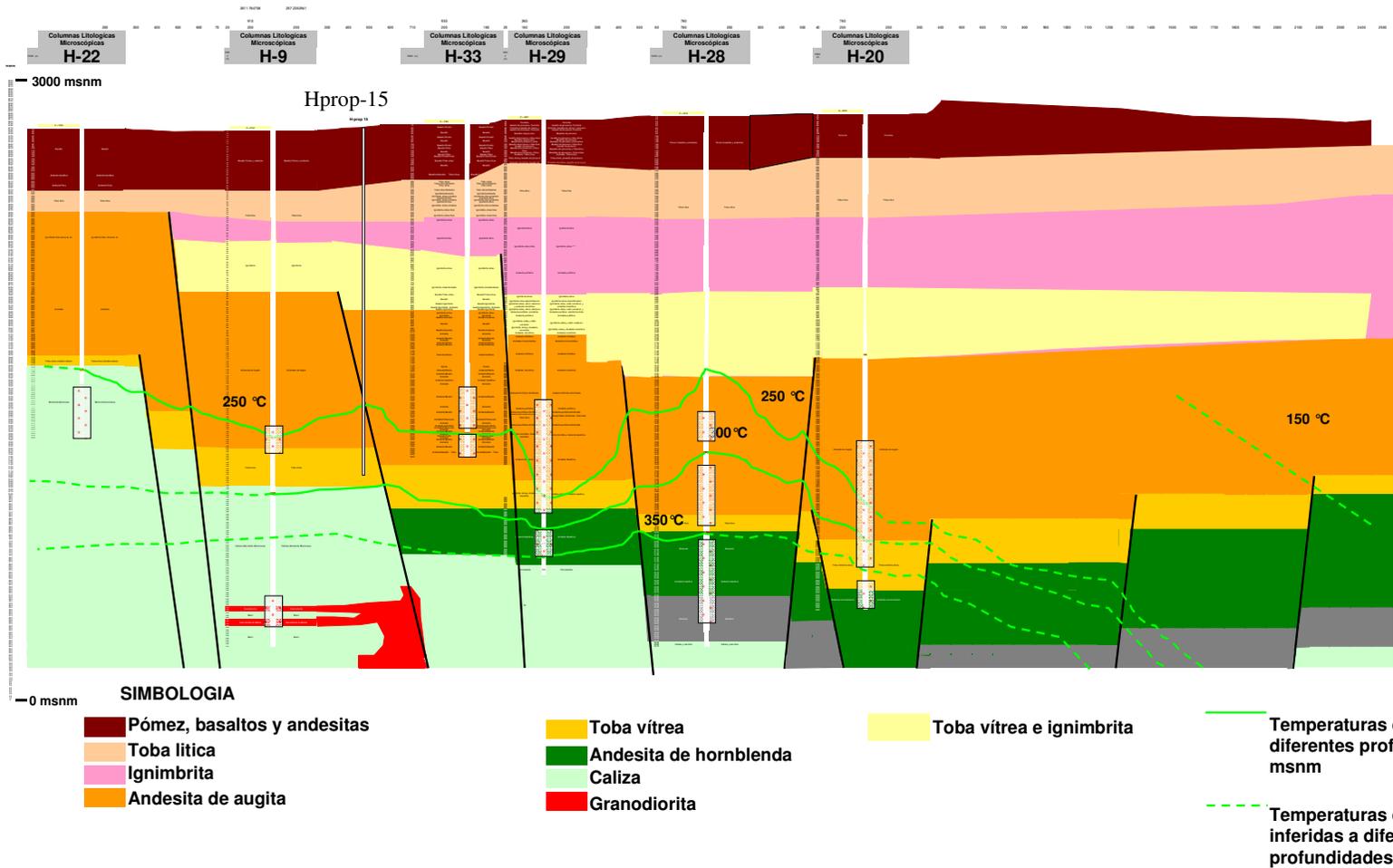


Figura 11.- Sección geológica, donde se muestra la ubicación posible del pozo Hprop-15, (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005)

## Sección Geológica I-I'

PROYECTO DE AMPLIACIÓN DEL CAMPO GEOTÉRMICO  
LOS HUMEROS, ESTADO DE PUEBLA

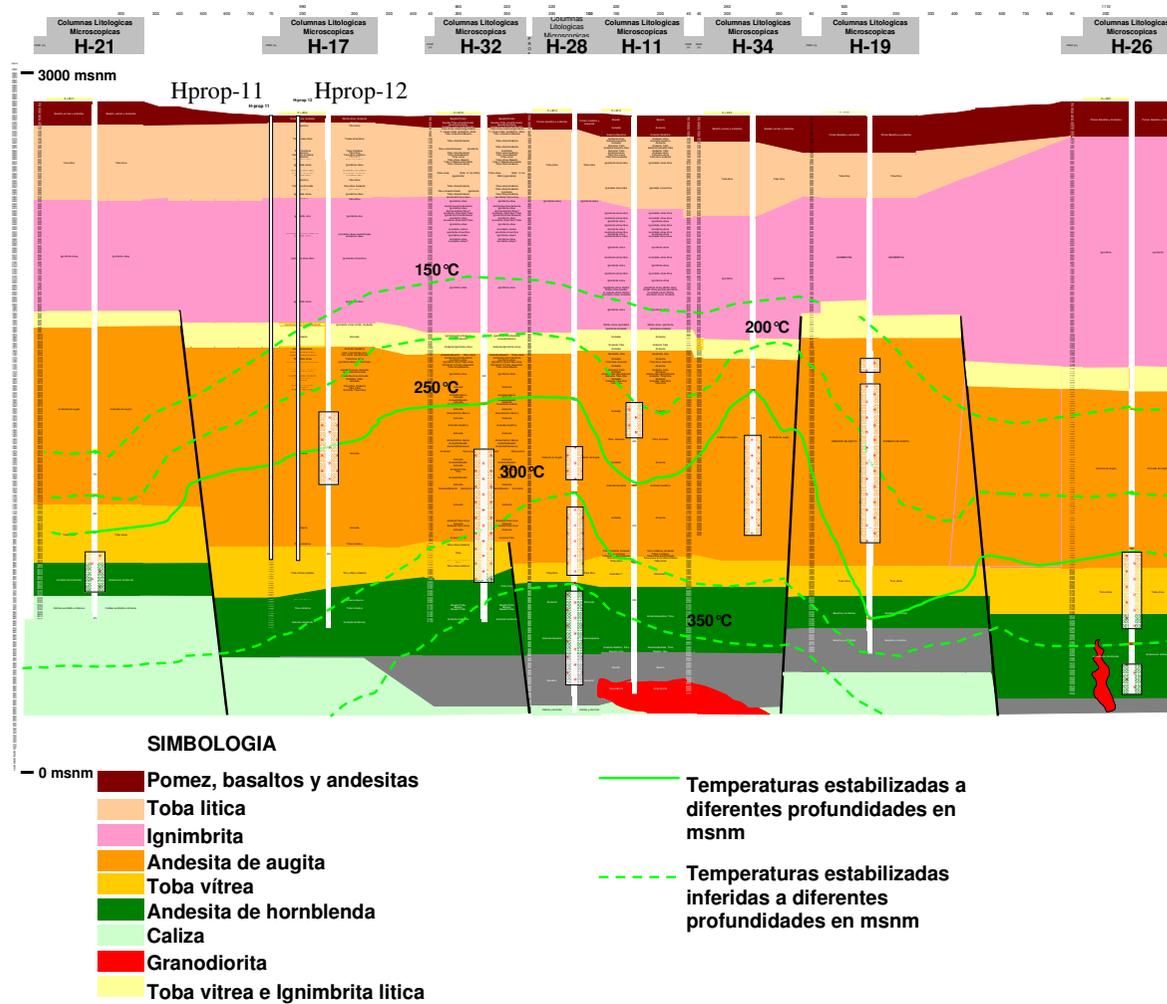


Figura 12.- Sección geológica, donde se muestra la ubicación posible del pozo Hprop-11 y 12 (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005)

## .Temperaturas

En la tabla 11 se infiere el comportamiento de las temperaturas medidas a diferentes profundidades, donde podemos apreciar el aumento a medida de que la profundidad va aumentando, donde se aprecia que estas no corresponde a un gradiente geotérmico normal, en la configuración a 1300 msnm los promedios de temperaturas son de 190 y 191.6 °C para las zonas sur y norte, respectivamente; dentro de la profundidad de 1000 msnm aparece un incremento más notable, de 5 a 6 °C, lo cual hace interesante la propuesta. A 800 msnm se estiman temperaturas de 213.3 °C y 226 °C, respectivamente, es decir un incremento más notable a esta profundidad y, por último, las temperaturas a 500 msnm son, en promedio, de 241.7 en la parte sur y 280.7 en la norte. Cabe señalar que estas son interpoladas y se calcularon a partir de las temperaturas medidas en los pozos más cercanos, y se elaboraron configuraciones de isovalores de temperaturas mostradas en las figuras 14,15 y 16.

De la misma manera se interpolaron las temperaturas a partir de las configuraciones hechas por los japoneses variando la profundidad y tomando en cuenta las zonas productoras antes descritas, como por ejemplo a 750 msnm se aprecian temperaturas de 193 °C en la zona sur y 310.6 °C en la norte; a 1000 msnm son de 190 y 289.3 °C, respectivamente, a 1250 msnm, se tienen 273.6 °C zona sur y de 195 °C en el norte. Es importante observar que es mayor la temperatura de los pozos en la zona norte del campo.

De las temperaturas estabilizadas utilizando el método de Horner tabla 10 mostrando su configuración de isovalores en la figura 13 se deduce lo siguiente: A la profundidad de 1000 se interpolan temperaturas del orden de los 258.3 °C en la zona sur y 259.3 °C en el norte, y a profundidades de 1300 msnm, se tiene que las temperaturas oscilan entre 157.3 y 155.7, respectivamente. Es obvio mencionar que en esta misma configuración, el norte posee las mejores temperaturas para realizar futuras perforaciones.

Pozo	1000 msnm	1300 msnm
Zona Sur		
1	260	199
2	255	196
3	260	197
Zona Norte		
11	260	258
12	257	257
13	256	254
14	266	262
15	264	245

tabla 10.- Temperaturas estabilizadas por Horner (°C), (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005)

Pozos	1500 msnm	1300 msnm	1000 msnm	800 msnm
Zona Sur				
1	200	190	200	212
2	170	180	185	210
3	210	200	200	218
Zona Norte				
11	295	290	265	295
12	293	272	253	293
13	315	310	300	315
14	314	290	282	314
15	320	295	280	320

tabla11.- Temperaturas medidas (°C), (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005).

En las siguientes figuras se presentan interpolaciones de valores de temperaturas estabilizadas realizadas en surfer, el cual nos permite ver el posible comportamiento en diferentes profundidades.

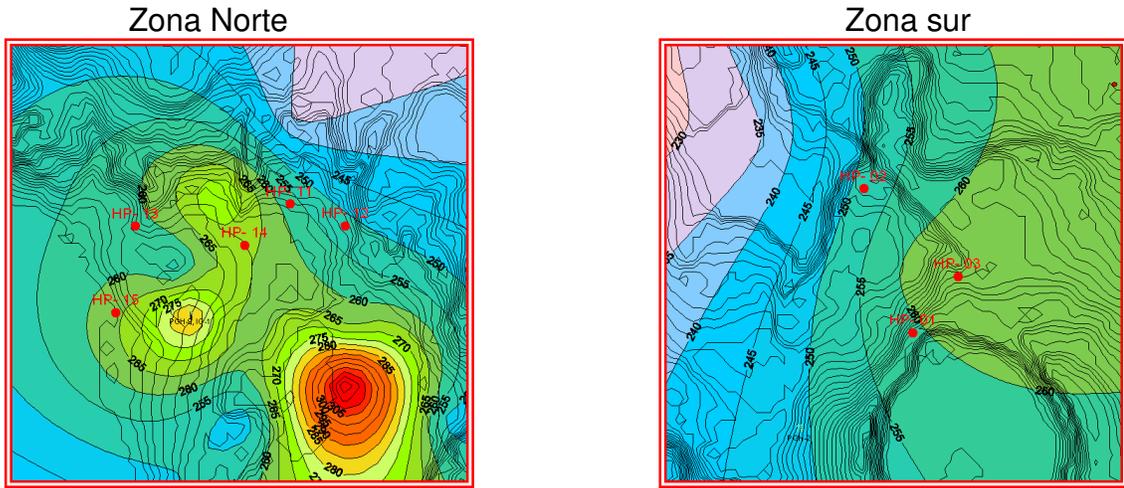


Figura 13.-Temperaturas Estabilizadas por Horner a 1000 msnm

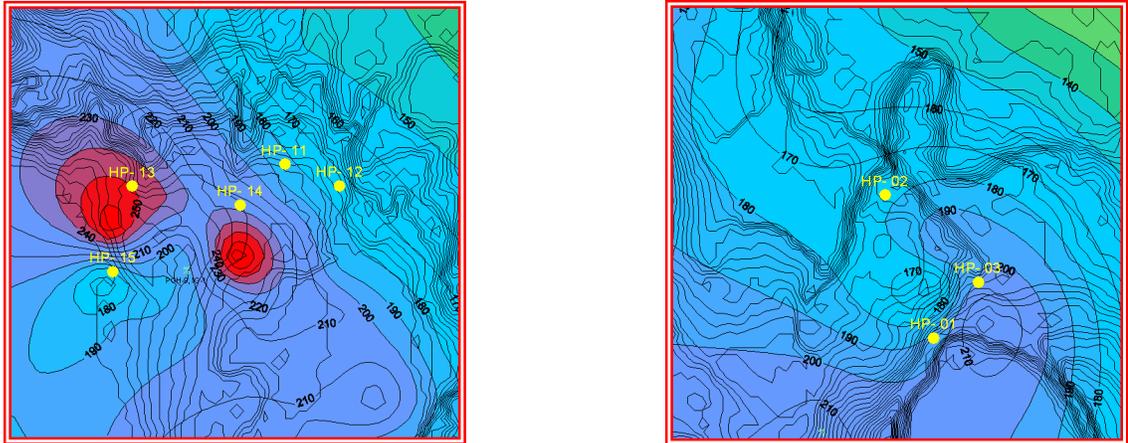


Figura 14.-Temperaturas medidas a 1300 msnm

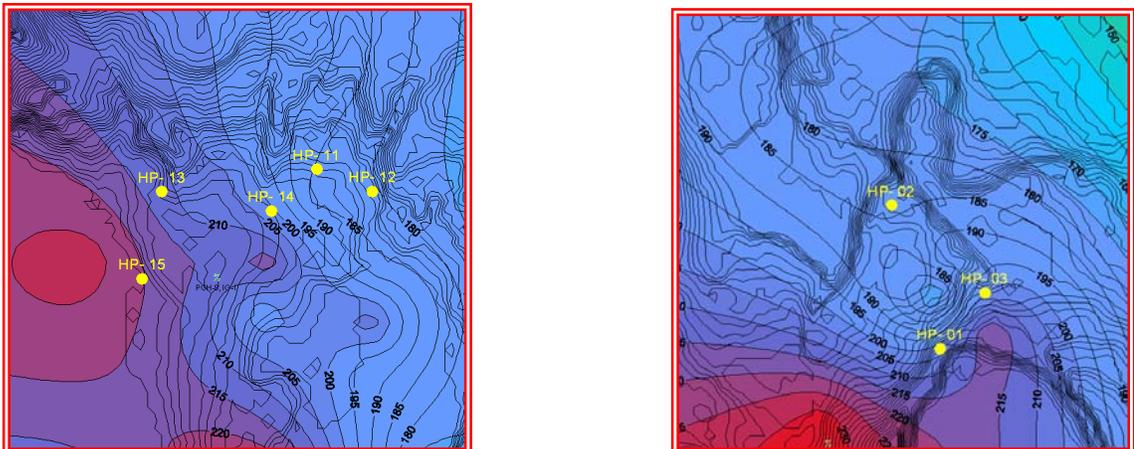


Figura 15.-Temperaturas medidas a 1000 msnm

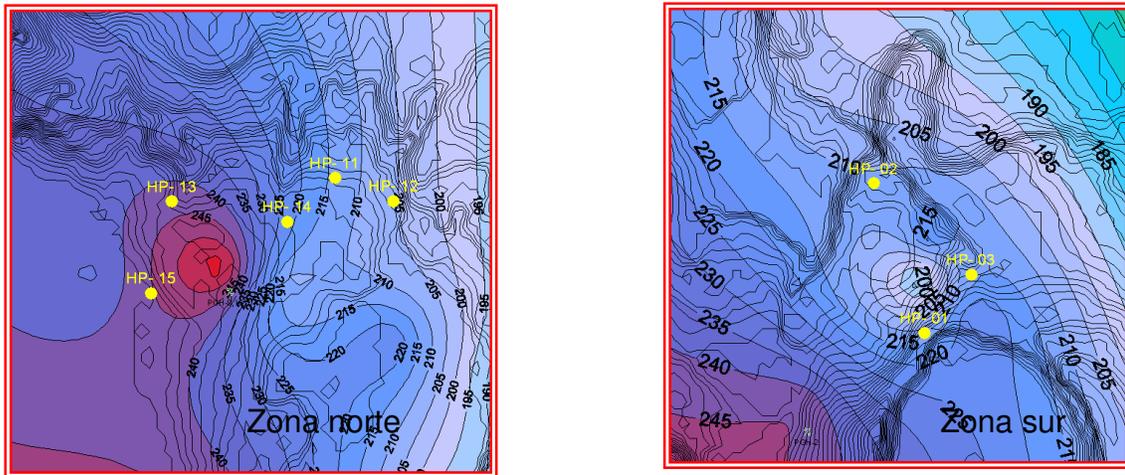


Figura 16.-Temperaturas medidas a 800 msnm

### Presiones

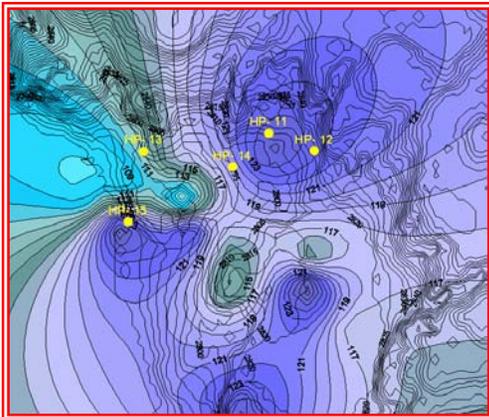
En la tabla 12 se puede observar el comportamiento de las presiones a diferentes profundidades y que el área de interés aparece entre los intervalos de 800-1000 msnm de profundidad. Las presiones se incrementan en función directa con la profundidad, pues en la zona sur se observan presiones de 124-126 kg/cm<sup>2</sup> a profundidades de 1000 msnm mientras que para 800 msnm son de 194a160 kg/cm<sup>2</sup>. Para la zona norte del campo las presiones generadas a profundidades de 1000 msnm varían entre 131-151 kg/cm<sup>2</sup> y a los 800 msnm son de 167 a 146 kg/cm<sup>2</sup>. Se puede observar que las presiones que podrían esperarse son buenas para las condiciones que se deben tener dentro de un yacimiento geotérmico. Figuras 17, 18 y 19.

Pozo	1500 msnm	1300 msnm	1000 msnm	800 msnm
Zona Sur				
1	94.5	110	124	172
2	90	107	127	194
3	94.2	111	126	160
Zona Norte				
11	105	122.5	151	167
12	105	122.2	150.5	167.9
13	96	112	139.5	152
14	103	120	146	162
15	108.3	123	131	146.9

tabla 12.- Presiones medidas ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005).

En las figuras siguientes se tienen interpolaciones de las presiones, ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), que se obtienen en surfer y permiten simular los posibles comportamientos en el subsuelo,

Zona norte



Zona sur

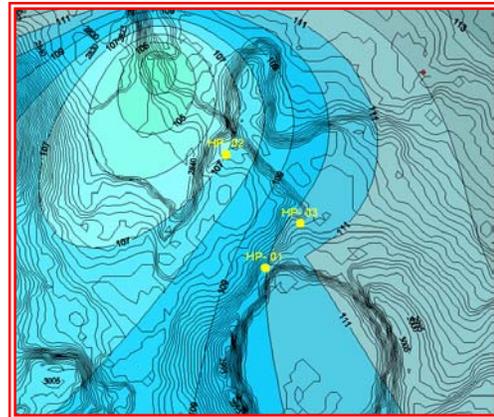
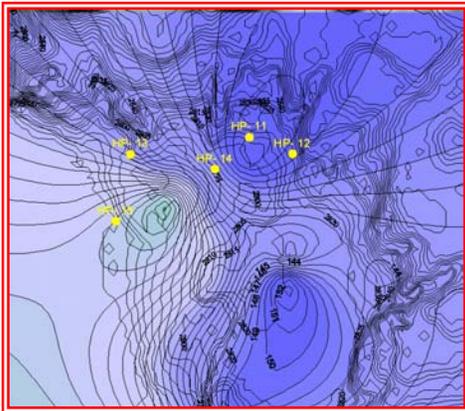


Figura 17.-Presiones medidas a 1300 msnm

Zona norte



Zona sur

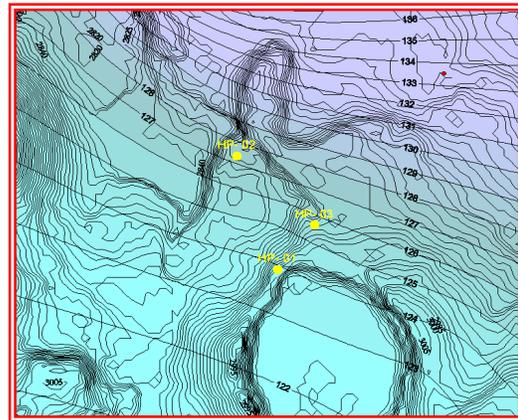


Figura 18.-Presiones medidas a 1000 msnm

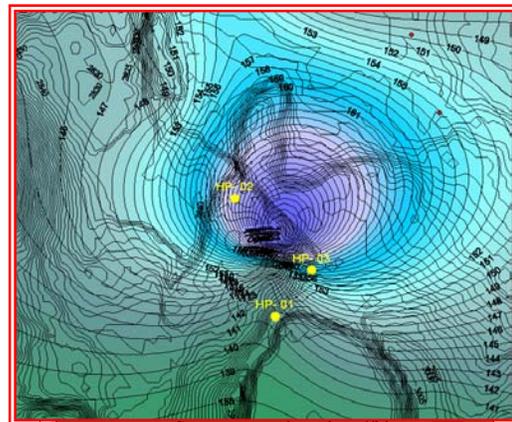
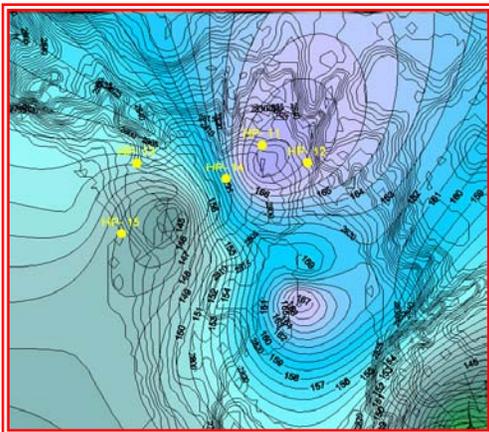


Figura 19.-Presiones medidas a 800 msnm

## Gastos

Cuando se interpolan los gastos de vapor medidos de los pozos productores, se generan un plano de isovalores que permite la interpretación de los gastos esperados.

De acuerdo con las interpolaciones de gastos de vapor, figuras 20 y 21, que se midieron en los pozos cercanos a la zona sur se tiene una estimación del potencial esperado de entre 40 y 49 t/h a 10 bar, (tabla 13) y configuraciones de isovalores, si se cambian las condiciones de descarga, se tendrán gastos de 46 a 40 t/h a 12 bares, condiciones que se consideran buenas para obtener el vapor que requiere la generación de energía eléctrica dentro de esa zona

En la zona norte la variación de gastos es distinta porque las condiciones de producción cambian, debido a la disminución de gas, a diferencia de la zona sur.

Con los isovalores se reflejan gastos que van de 55-25 t/h de vapor, a 10 bares (tabla 11), y las condiciones de producción varían muy poco a 12 bares, ya que se

tienen valores de 54.5-25 t/h, de modo que se puede considerar que existen buenas condiciones de producción para este sector.

POZOS	Q (vapor 10 bar)	Q (agua 10 bar)	Q (vapor 12 bar)	Q (agua a 12 bar)
Zona Sur				
1	40	10	40	10
2	49	18	36.5	18.5
3	45	2.5	46	3.2
Zona Norte				
11	35	2.2	35	2.5
12	43	2	38	2
13	55	4.9	54.5	3.2
14	25.5	2.1	27.5	4.8
15	25	3	25	5

tabla 13.- Gastos de vapor y agua (t/h), (información geológica y general del campo de Los Humeros, 1999-2005)

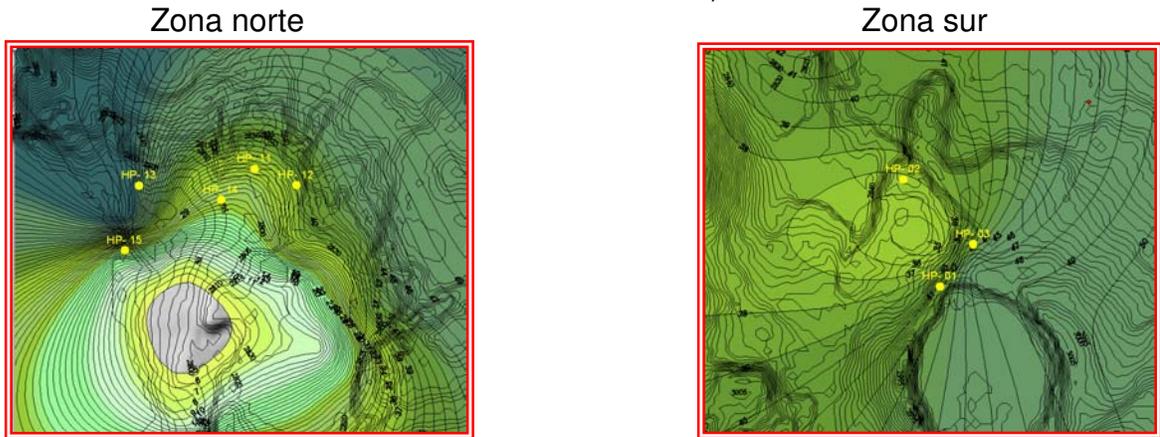
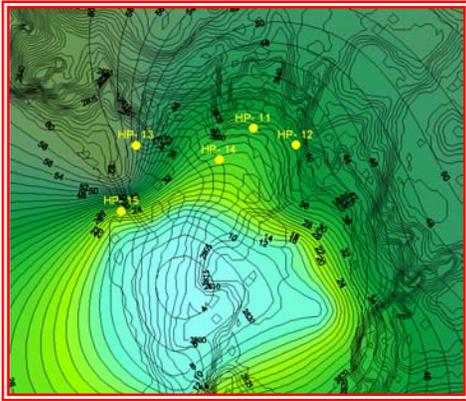


Figura 20.-Gastos de Vapor a 10 bar

Zona norte



Zona sur

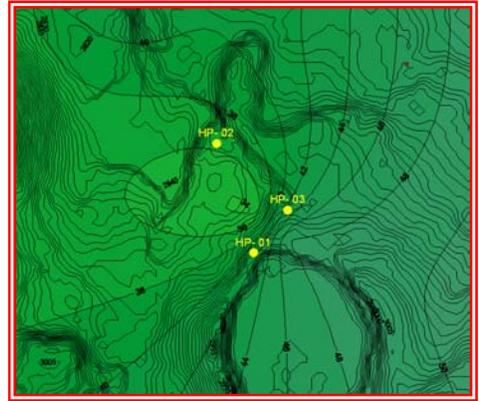


Figura 21.-Gasto de vapor a 20 bar

## **Conclusiones y recomendaciones**

Es factible desarrollar el proyecto como se ha planteado, instalar una unidad generadora de 25 MW para contribuir a satisfacer la demanda de energía de la región oriente del área y al mismo tiempo observar el comportamiento del yacimiento bajo una mayor demanda. Si se demuestra una capacidad mayor en el yacimiento se plantearía una segunda etapa con otra unidad generadora de 25 MW.

En el sector noreste del campo de Los Humeros, el yacimiento se encuentra alojado en las rocas andesíticas, tanto en el yacimiento superior, como en el inferior, sin embargo, desde el punto de vista de la calidad química de los fluidos producidos, se concluye que el intervalo productor preferente a explotar se localiza de 1500 a 1000 msnm dentro de la formación de las andesitas de augita, es posible también obtener fluido del yacimiento inferior siempre y cuando no se combinen ambos.

En los pozos propuestos se esperan condiciones termodinámicas y de permeabilidad favorables para el suministro de vapor a las unidades generadoras del campo

A futuro se tiene contemplado también la repotenciación de las unidades generadoras de 5 MW mediante el aprovechamiento del vapor que estas plantas descargan a la atmósfera al instalarles plantas de baja presión o ciclos binarios que aprovechen la energía residual del vapor

Se recomienda realizar un levantamiento geológico-estructural a detalle, reconociendo las principales estructura que pueden regir el movimiento de fluidos, así como la identificación del microfracturamiento de la roca, ya que esta es fundamental para conocer el comportamiento de la roca con respecto a su formación y dinamismo del yacimiento.

## Bibliografía

- |    |   |               |   |
|----|---|---------------|---|
| 1  | Cedillo Rodríguez Fidel                             | 1997          | Geología del Subsuelo del Campo Geotérmico de Los Humeros , Pue., Informe RE/HU/03/97   |
| 2  | CFE   | 1994          | Construcción y reparación de pozos del campo geotérmico de Los Humeros en 1984, Residencia de Los Humeros Pue.  |
| 3  | CFE   | 1999-<br>2005 | Información geológico y general para el análisis de los diversos sectores del campo geotérmico , Residencia de Los Humeros.   |
| 4  | De La Cruz Martínez Venancio                        | 1983          | Estudio Geológico a detalle de la zona geotérmica, Los Humeros, Puebla, Informe 10/83, Comisión Federal de Electricidad   |
| 5  | García Estrada Gerardo                              | 2004          | Estudio sobre la identificación de fallas con métodos geofísicos en el campo geotérmico de los Humeros pue., Informe interno. Comisión Federal de Electricidad.                                 |
| 6  | Gerencia de proyectos Geotermoeléctricos, CFE       | 2005          | Factibilidad del proyecto Humeros II  |
| 7  | Gutiérrez-Negrín Luís CA and Quijano León José luís | 2004          | Updates of Geothermics in Mexico, Geotermia, Revista Mexicana de Geotermia, ISS 0186-5897, Vol. 17 No. 1, p21-30  |
| 8  | INEGI   | 1999          | Carta topográfica Xonactlán, esc. 1:50,000, Puebla y Veracruz.  |
| 9  | Jiménez Salgado Esteban                             | 2004          | Monitoreo de los niveles estáticos alrededor del campo geotérmico Los Humeros pue., reporte interno 2004.   |
| 10 | Jiménez Salgado Esteban                             | 2005          | Resultado de la medición de niveles estáticos de los diferentes aprovechamientos de agua (pozos, norias y manantiales aledaños al campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, reporte interno 2005 |
| 11 | López Hernández Aída                                | 1995          | Estudio Geológico Estructural de las Rocas del Yacimiento del Campo Geotérmico de Los Humeros, Pue., Informe OGL-HU-014-14/95, Comisión Federal de Electricidad.                                |

- |    |   |      |   |
|----|---|------|---|
| 12 | López Romero Oscar                                    | 2004 | Actualización del Modelo Geoquímico de Los Humeros, Puebla, México, Residencia de Estudios, Los Humeros Puebla, Comisión Federal de Electricidad, informe interno.  |
| 13 | Ruggero Bertani                                       | 2005 | World Geothermal Generation 2001-2005: state of Art, Proceeding World Geothermal Congress 2005, Antalaya, Turkey, 24-29   |
| 14 | Segura Calderón Herminio                              | 1990 | Estudio Geológico de Prefactibilidad del Sistema Hidroeléctrico Atexcaco, Estado de Puebla, México. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Ingeniería Civil, subgerencia de Estudios Geológicos, Cuernavaca Morelos. |
| 15 | Tello Hinojosa, Enrique<br>Mahendra P. V, Tovar A. R. | 1992 | Origin of acidity in the los humeros geothermal reservoir   |

## Álbum Fotográfico



Foto 2.- Zona Norte (vista E-W)



Foto 1.- Zona Sur (vista SW)



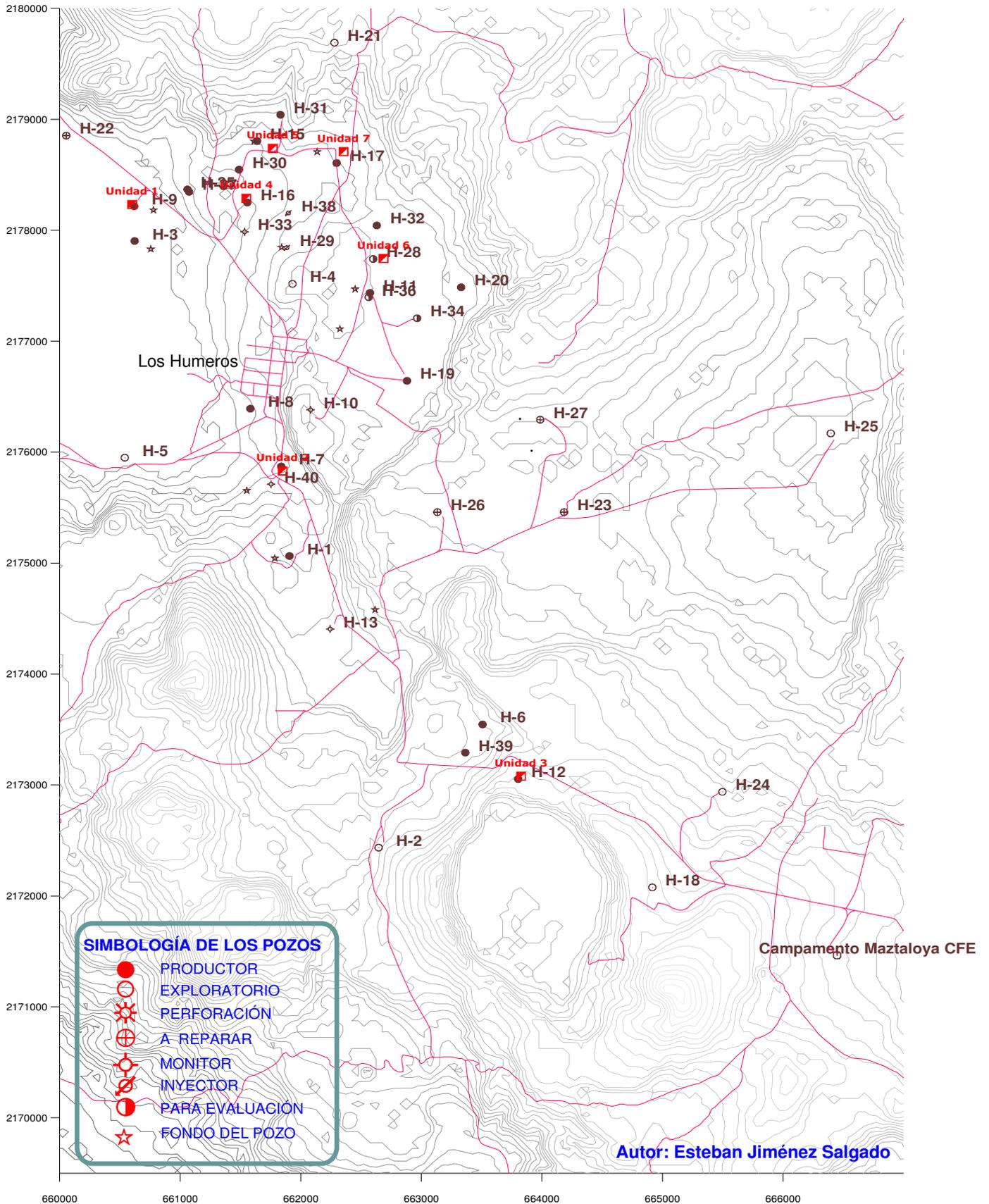
Foto 3.-Vista de la Unidad No. 3



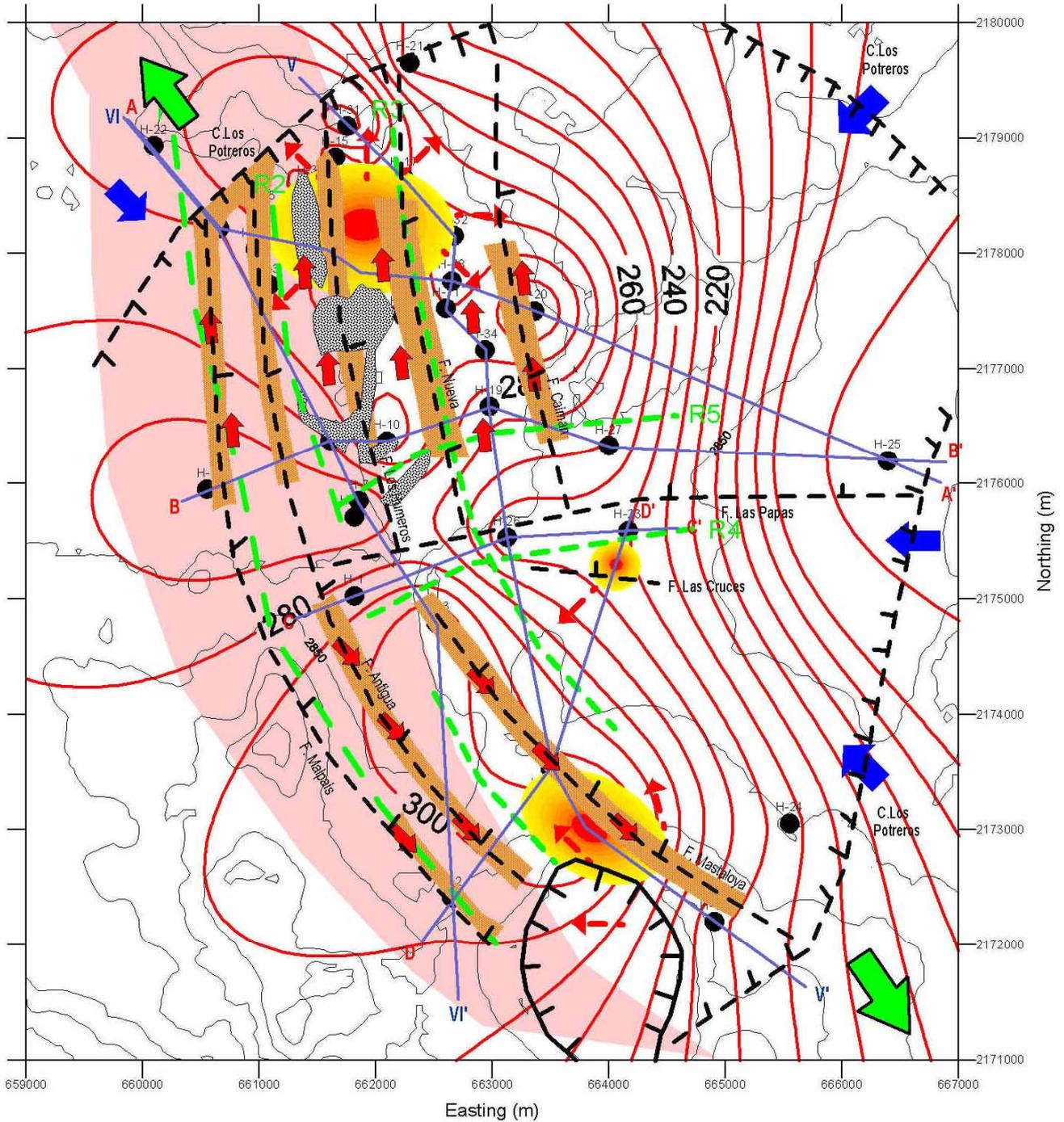
Foto 2.- Vista general del campo, (NE-SW)

## ANEXOS

### 1.-Plano topográfico del campo geotérmico de Los Humeros Puebla.



2.-Modelo conceptual del campo de Los Humeros, Puebla.



- |  |                         |  |                            |  |   |
|--|-------------------------|--|----------------------------|--|---|
|  | FUENTE LOCAL DE CALOR   |  | FALLAS                     |  | LÍNEA DE ISOTERMAS A 1000 MSNM                |
|  | FLUJO LOCAL DE DE CALOR |  | LÍNEA DE SECCION CON POZOS |  | ZONA DE ALTERACIÓN                            |
|  | FLUIDO GEOTÉRMICO       |  | DISCONTINUIDAD ELECTRICA   |  | YACIMIENTO GEOTÉRMICO                         |
|  | RECARGA METEÓRICA       |  | DESCARGA                   |  | FUENTE DE CALOR PROFUNDO (BASAMENTO CALCAREO) |