



Inter-American Development Bank

INFORME PREPARADO PARA LA CRE, CON EL APOYO DEL BID

Evaluación de la Energía Geotérmica en México



Dr. Gerardo Hiriart Le Bert
Consultor del BID y Director General de **ENAL**

Particularidades de las tecnologías para generación con energías renovables

❖ **Eólica.** (Intermitente, poco predecible, económica)

- Fácil de evaluar el potencial
- Muy poca integración nacional
- Costo de la inversión, predecible



❖ **Solar.** (Cíclica, predecible, cara)

- Fácil de evaluar el potencial
- Muy poca integración nacional
- Costo de la inversión, predecible



❖ **Minihidro.** (Dependiente del riego, poco predecible)

- Fácil de evaluar el potencial
- Alta integración nacional
- Costo de la inversión, predecible. Gestión complicada

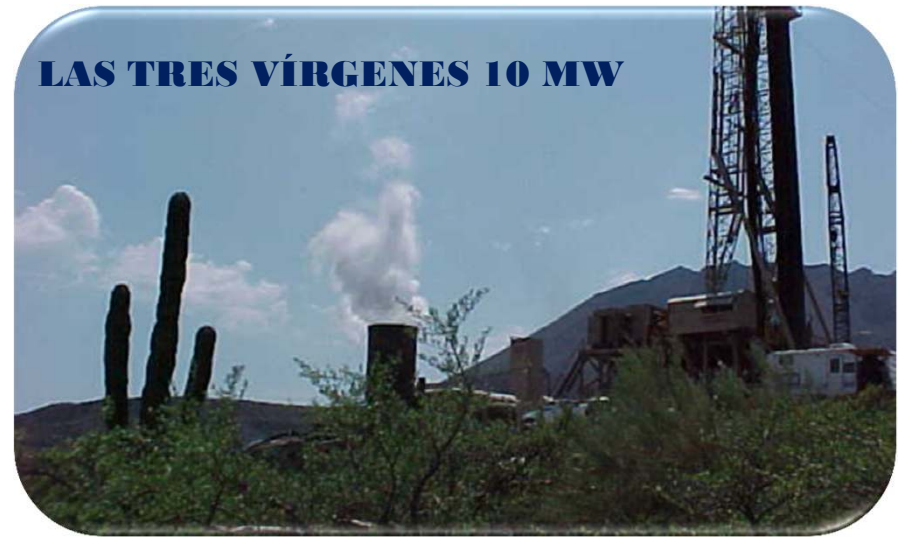


❖ **Geotérmica.** (Permanente, despachable, económica)

- Difícil conocer a priori el potencial (**alto riesgo**)
- Alta integración nacional
- Costo de inversión en pozos incierta (**alto riesgo**)



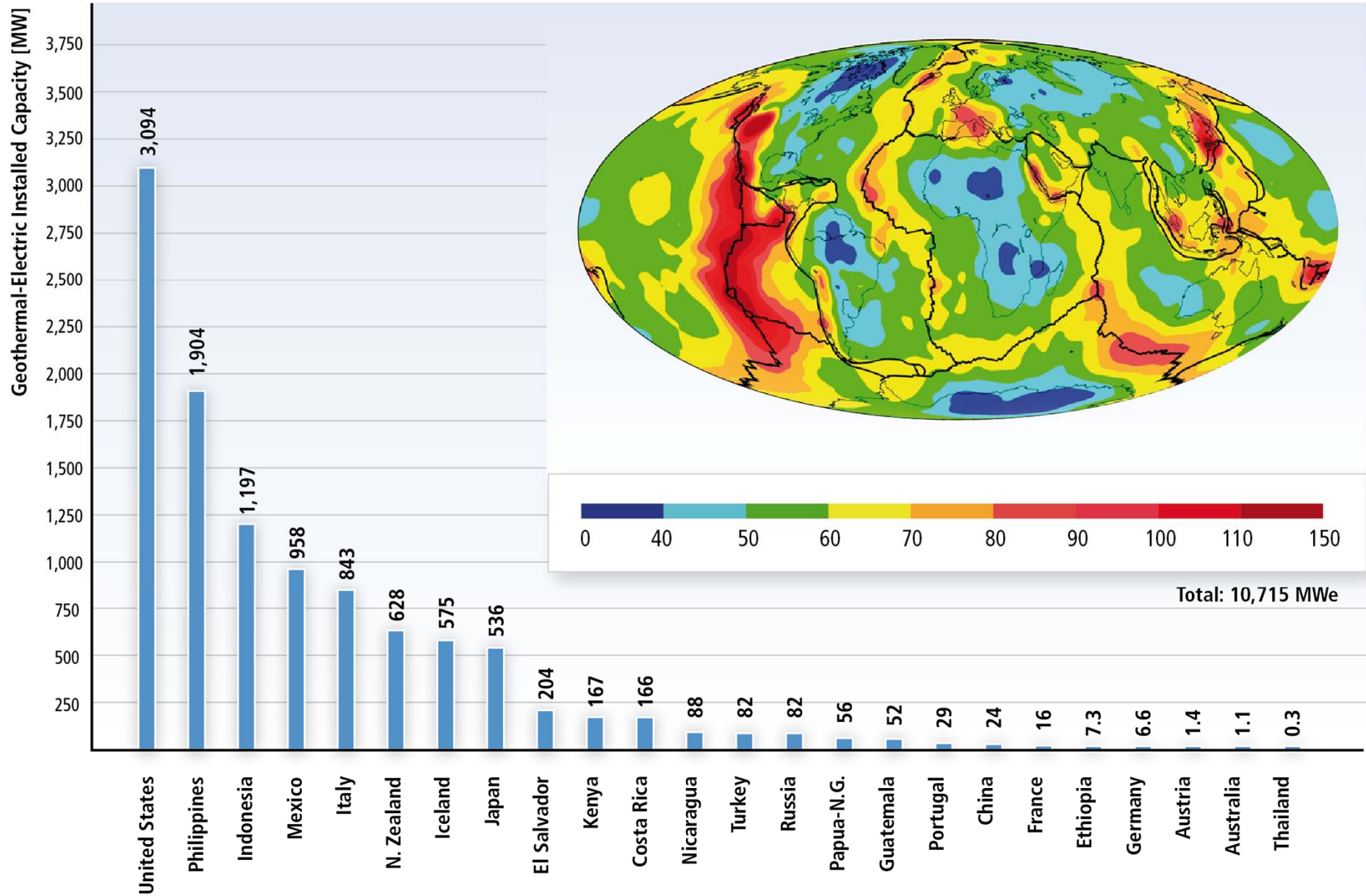
Campos geotérmicos Mexicanos



Campos geotérmicos Mexicanos



Potencia geotérmica mundial instalada, enero 2011





- Revisar los estudios de exploración y las perspectivas que a la fecha se han realizado en geotermia en el país para proponer una serie de posibles campos geotérmicos que eventualmente se podían explotar calculando su potencial estimado
- Hacer una revisión de las técnicas actuales de exploración geotérmica destacando las más recientes que se han desarrollado a nivel mundial
- Hacer una síntesis de la legislación actual en el país para el caso de la geotermia y proponer acciones para desarrollar una adecuada a las circunstancias actuales

1. RECOPIACIÓN y EVALUACION DE LAS ZONAS GEOTÉRMICAS DE MÉXICO

1.1. RECOPIACIÓN DE ESTIMACIONES DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO

1.2. MÉTODO DE TRABAJO DE ESTE ESTUDIO

1.2.1. Modelo volumétrico con simulación Montecarlo

1.2.2. Modelo de descompresión gradual

1.3. ZONAS SELECCIONADAS CON BUEN POTENCIAL

ZONA GEOTÉRMICA DE LA SOLEDAD, JAL.

ZONA GEOTÉRMICA DE LAS PLANILLAS, JAL.

ZONA GEOTÉRMICA DE PATHÉ, HGO.

ZONA GEOTÉRMICA DE ARARÓ, MICH.

ZONA GEOTÉRMICA DE ACOCULCO, PUE.

ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICH.

ZONA GEOTÉRMICA DE LOS NEGRITOS. MICH.

ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN CEBORUCO, NAY

ZONA GEOTÉRMICA DEL GRABEN DE COMPOSTELA, NAY.

ZONA GEOTÉRMICA DE SAN ANTONIO EL BRAVO (OJINAGA), CHIH.

ZONA GEOTÉRMICA DE MAGUARICHIC, CHIH.

ZONA GEOTÉRMICA DE PURUÁNDIRO, MICH.

ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN TACANÁ, CHIAPAS

ZONA GEOTÉRMICA DE ORITO-BORBOLLONES, JAL

ZONA GEOTÉRMICA DE SANTA CRUZ DE ATISTIQUE, JAL.

ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN CHICHONAL, CHIAPAS.

ZONA GEOTÉRMICA DE HERVORES DE LA VEGA, JAL.

ZONA GEOTÉRMICA DE LOS HERVORES-EL MOLOTE, NAY.

ZONA GEOTÉRMICA DE SAN BARTOLOMÉ DE LOS BAÑOS, GTO.

ZONA GEOTÉRMICA DE SANTIAGO PAPASQUIARO, DGO.

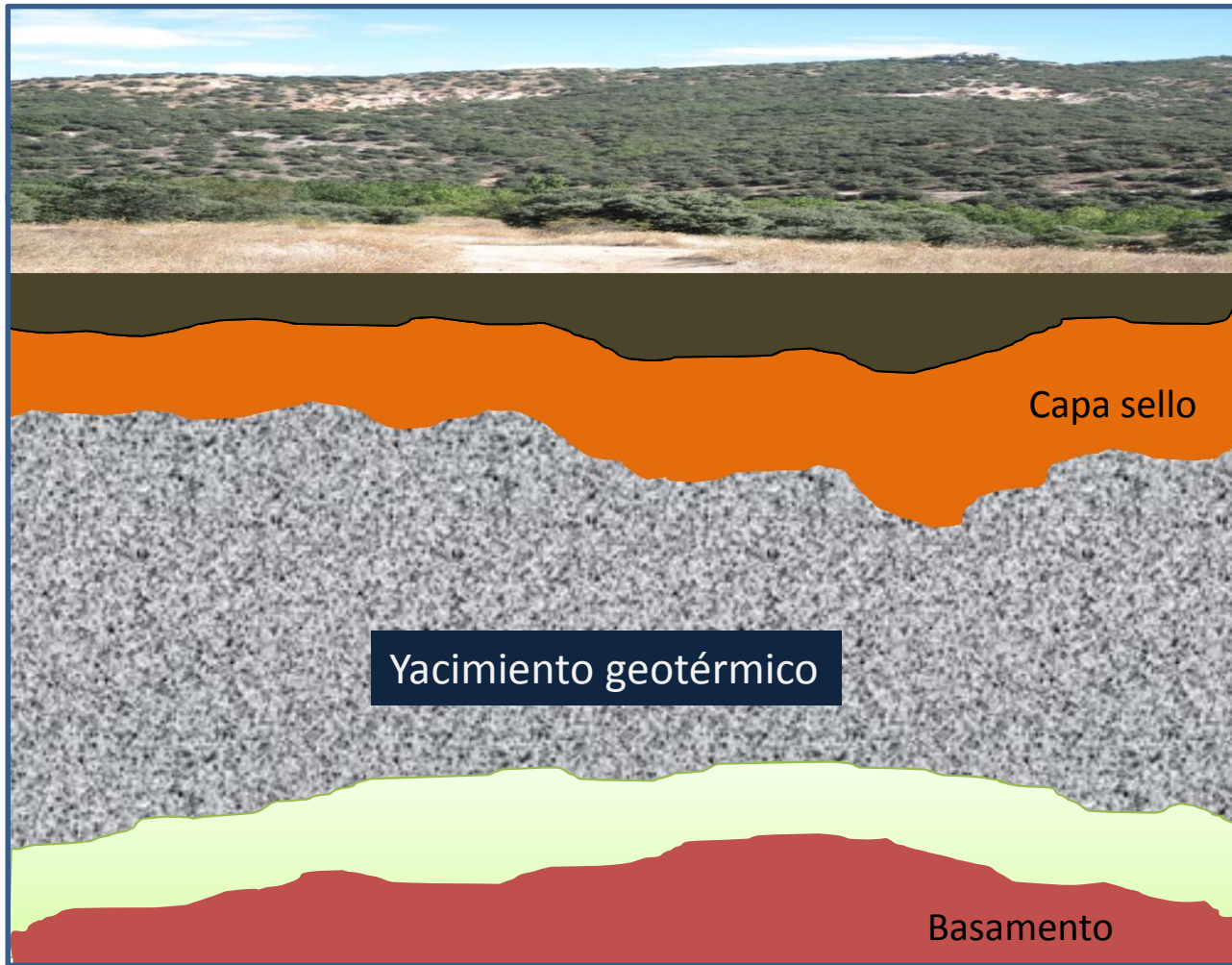
1.4. POTENCIAL GEOTÉRMICO EN ROCA SECA CALIENTE (EGS) EN MÉXICO

1.5. POTENCIAL GEOTÉRMICO DE MÉXICO CON RECURSOS HIDROTERMALES SUBMARINOS

Revisión de estudios y evaluaciones anteriores

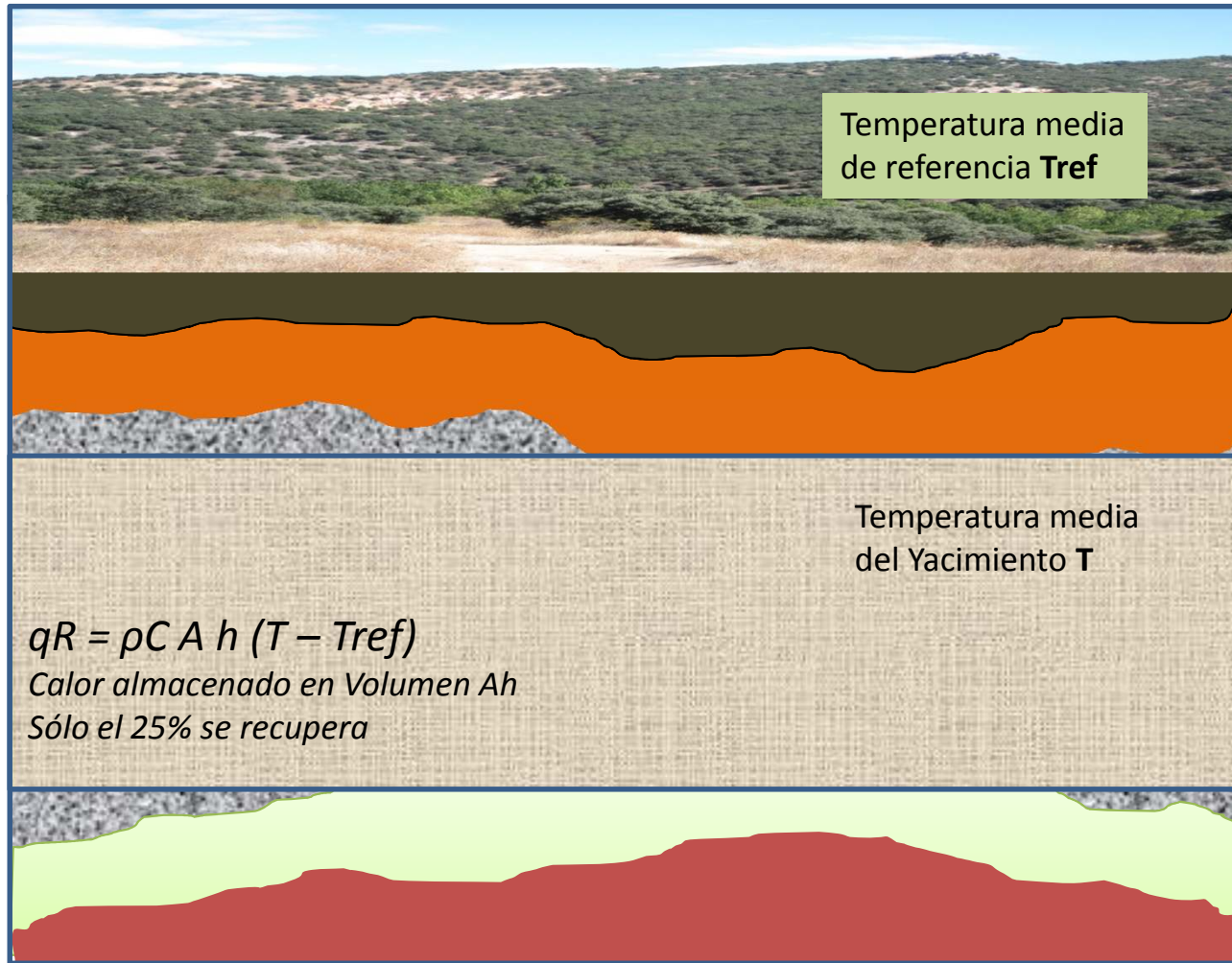
Autor	Año	Capacidad instalada en esa fecha (MW)	Principales premisas y bases de la estimación	Total (MW)
Alonso, H.	1975	75	Se asumió un potencial de 500 MW en Cerro Prieto, 100 MW en diversas zonas estudiadas y 75 MW en cada una de las zonas descubiertas hasta esa fecha.	4,000
Mercado, S.	1976	75	Método volumétrico con base en características geoquímicas de las manifestaciones conocidas en esa fecha.	13,110
Alonso, H.	1985	170	Estimación geológica. Estimó Reservas probadas 1340 MW, probables 4600 MW y posibles de 6000 MW.	11,940
Mercado y otros	1985	170	Método volumétrico estimando recursos de temperaturas intermedias (125-135°C) en dos zonas del país: centro (3600 km ² y 2 km de espesor) y sur (2000 km ² y 1.5 km de espesor).	45,815
Iglesias y Torres	2009	958	Estimación calor almacenado a 3 km método volumétrico y Montecarlo para el 21% de las 1310 manifestaciones reportadas (1993) de temperatura baja a intermedia en 20 estados.	77-86 (EJ térmicos)
Ordaz y otros	2011	958	Método volumétrico sobre 1300 localidades de baja a alta temperatura. Reservas probadas: 186 MW, probables: 2077 MW, posibles: 7423 MW.	9,686

Metodología usada para la estimación del potencial de una zona geotérmica



Método Volumétrico

Con análisis Montecarlo de los datos de entrada





Potencial geotérmico de la República Mexicana (2011)

Christian Arturo Ordaz Méndez, Magaly Flores Armenta y Germán Ramírez Silva

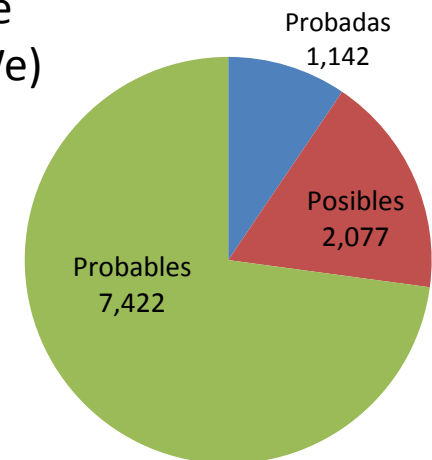
Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos

Aplicando Método Volumétrico del USGS y con factor de recuperación térmica de 0.25 y de eficiencia en central de 0.18/0.125/0.11 :

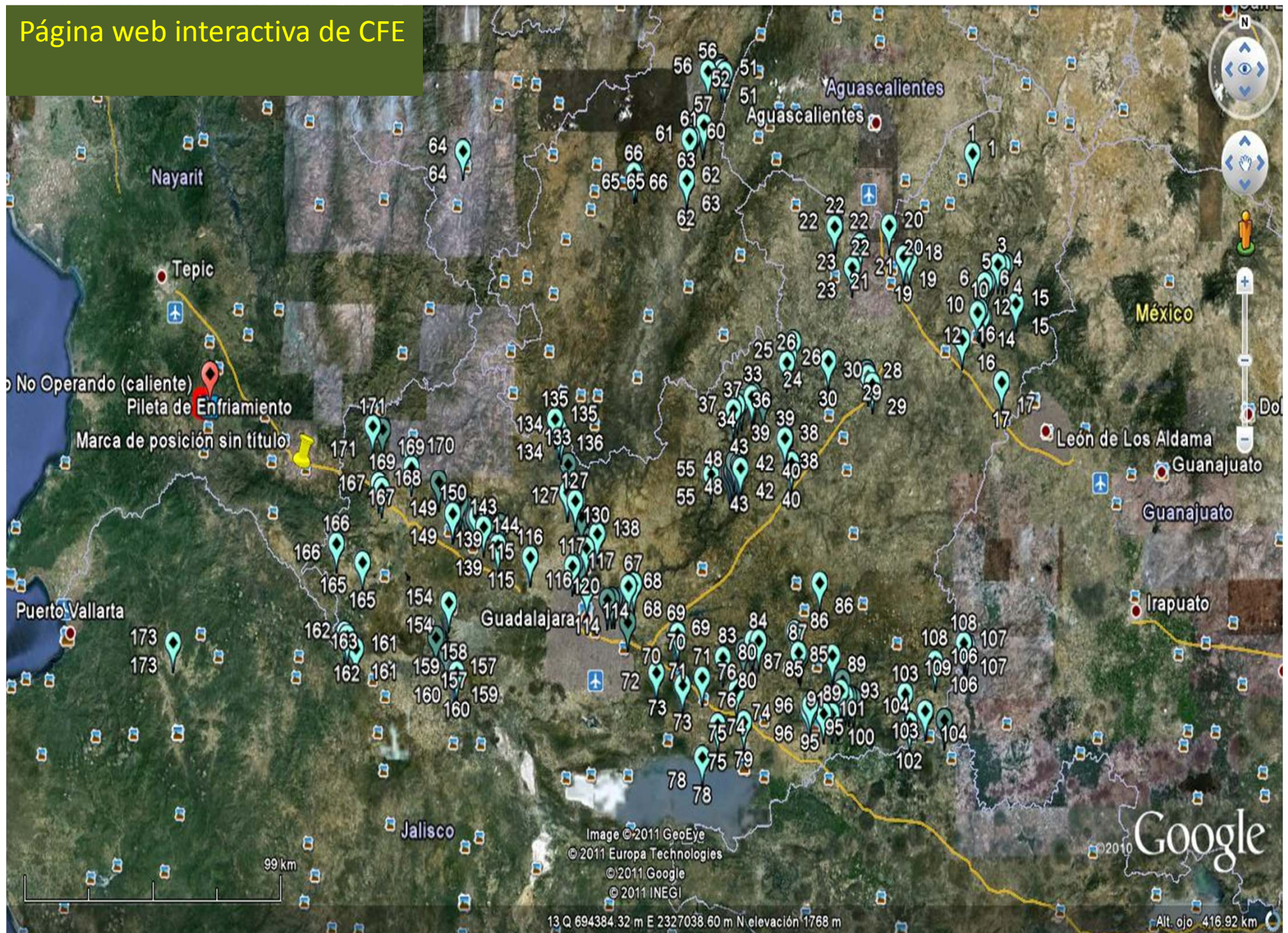
*Reservas **Posibles*** de recursos de alta entalpía 5691 MWe, moderada entalpía 881 MWe y baja entalpía de 849 MWe : Total de **7422** MWe.

*Reservas **Probables*** de recursos de alta entalpía 1643 MWe, moderada entalpía de 220 MWe y baja entalpía de 212 MWe: Total de **2077** MWe.

*Reservas **Probadas*** se tomaron como la capacidad adicional que puede instalarse en cada uno de los campos geotérmicos conocidos (186 MWe) más lo instalado (956 MW): Total **1,142** MW



Página web interactiva de CFE



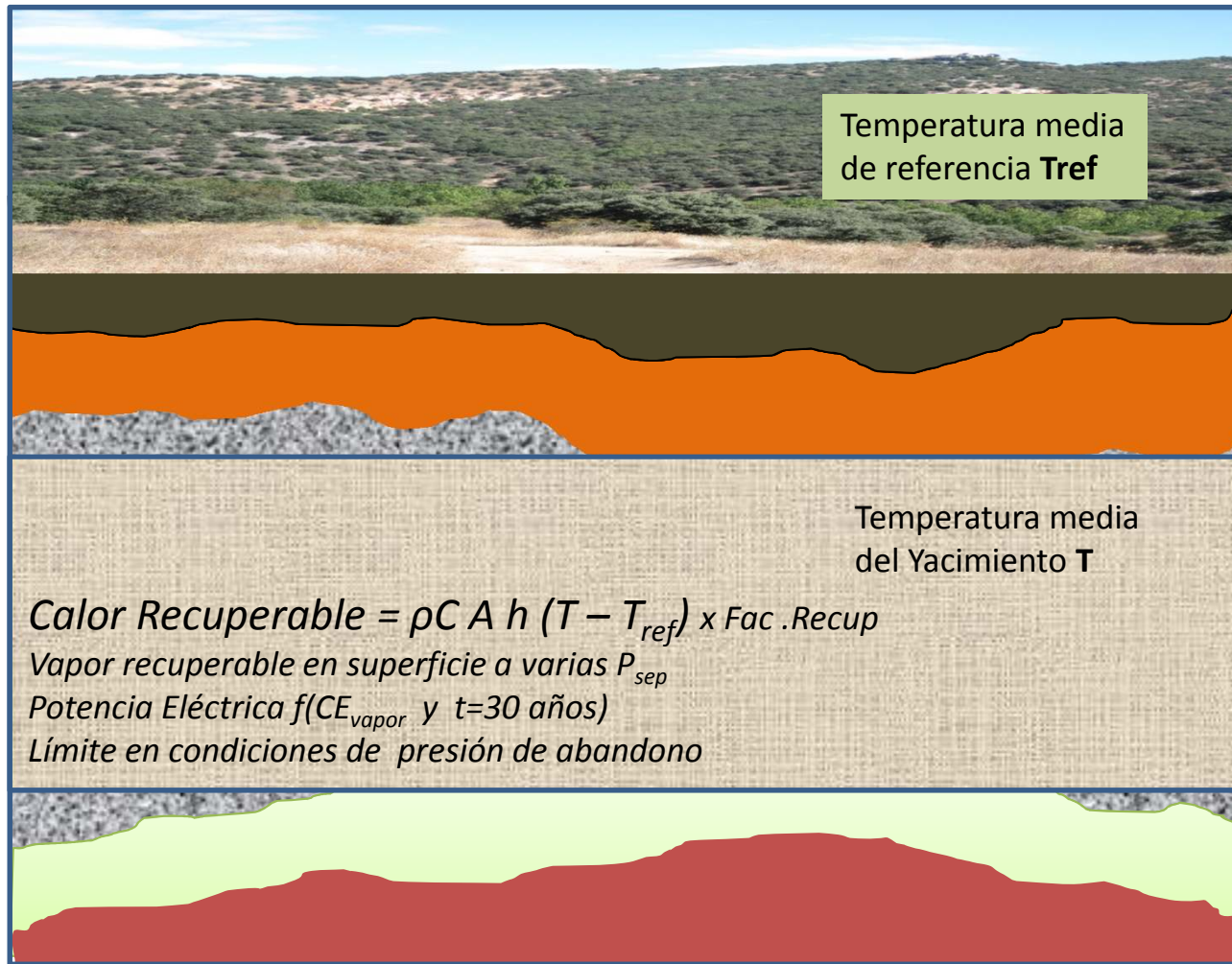
Se seleccionaron 20 zonas geotérmicas con buen potencial

1. ZONA GEOTÉRMICA DE LA SOLEDAD, JAL
2. ZONA GEOTÉRMICA DE LAS PLANILLAS, JAL.
3. ZONA GEOTÉRMICA DE PATHÉ, HGO.
4. ZONA GEOTÉRMICA DE ARARÓ, MICH.
5. ZONA GEOTÉRMICA DE ACOCULCO, PUE.
6. ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICH.
7. ZONA GEOTÉRMICA DE LOS NEGRITOS. MICH.
8. ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN DEL CEBORUCO, NAY.
9. ZONA GEOTÉRMICA DEL GRABEN DE COMPOSTELA, NAY.
10. ZONA GEOTÉRMICA DE SAN ANTONIO EL BRAVO (OJINAGA), CHIH.
11. ZONA GEOTÉRMICA DE MAGUARICHIC, CHIH.
12. ZONA GEOTÉRMICA DE PURUÁNDIRO, MICH.
13. ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN TACANÁ, CHIAPAS
14. ZONA GEOTÉRMICA DE EL ORITO BORBOLLONES
15. ZONA GEOTÉRMICA DE SANTA CRUZ DE ATISTIQUE, JAL.
16. ZONA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN CHICHONAL, CHIS
17. ZONA GEOTÉRMICA DE HERVORES DE LA VEGA, JAL.
18. ZONA GEOTÉRMICA DE LOS HERVORES-EL MOLOTE, NAY.
19. ZONA GEOTÉRMICA DE SAN BARTOLOMÉ DE LOS BAÑOS, GTO.
20. ZONA GEOTÉRMICA DE SANTIAGO PAPASQUIARO, DGO.

- ✓ Estudió los reportes de geología, geoquímica y geofísica
- ✓ Describió sus principales características geotérmicas (A, h, T, Roca, etc.)
- ✓ Evaluó Potencial Eléctrico por Método Volumétrico y Descompresión Gradual

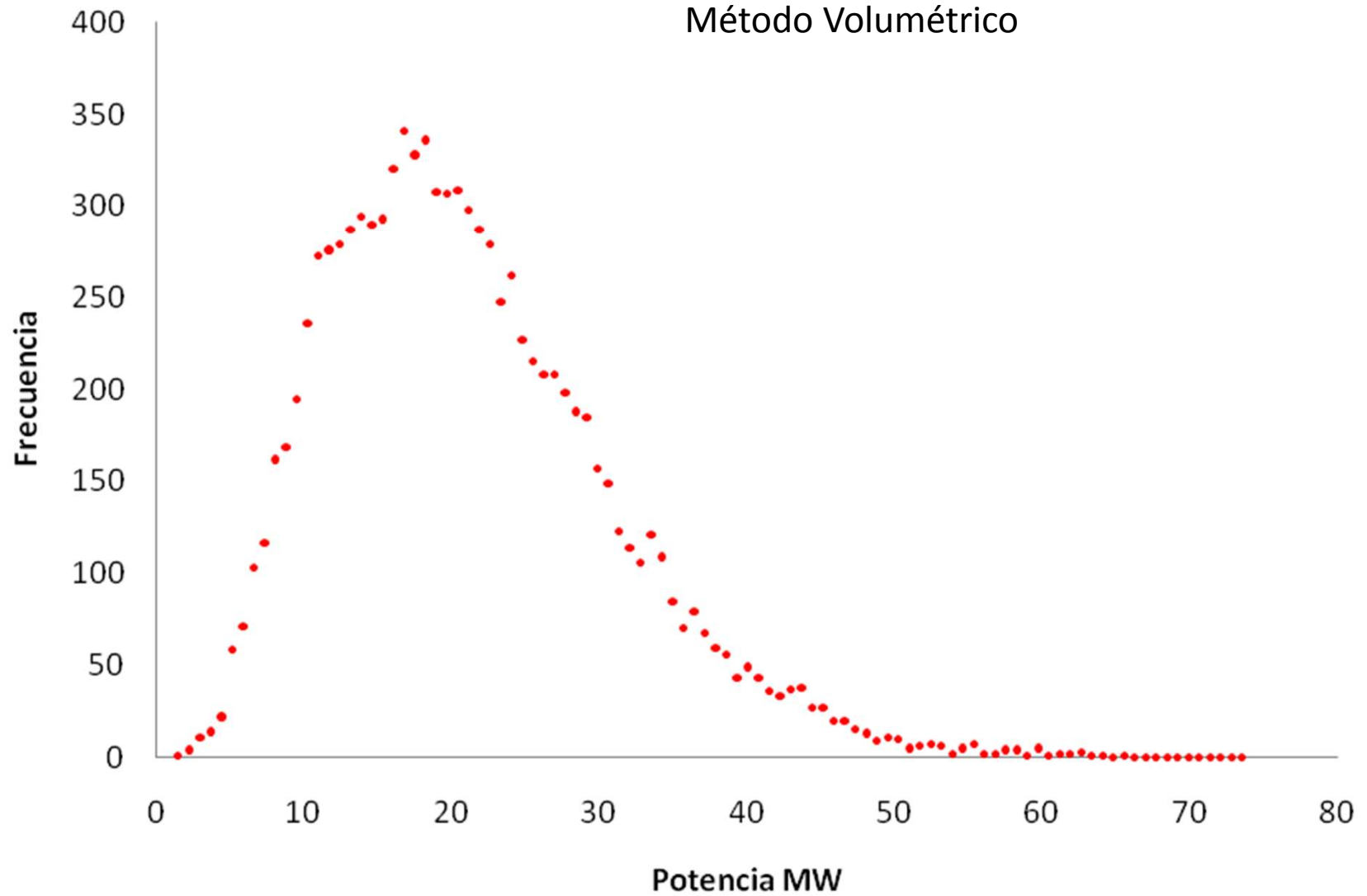
Potencial Eléctrico

Método Volumétrico (USGS Heat in Place) y Montecarlo



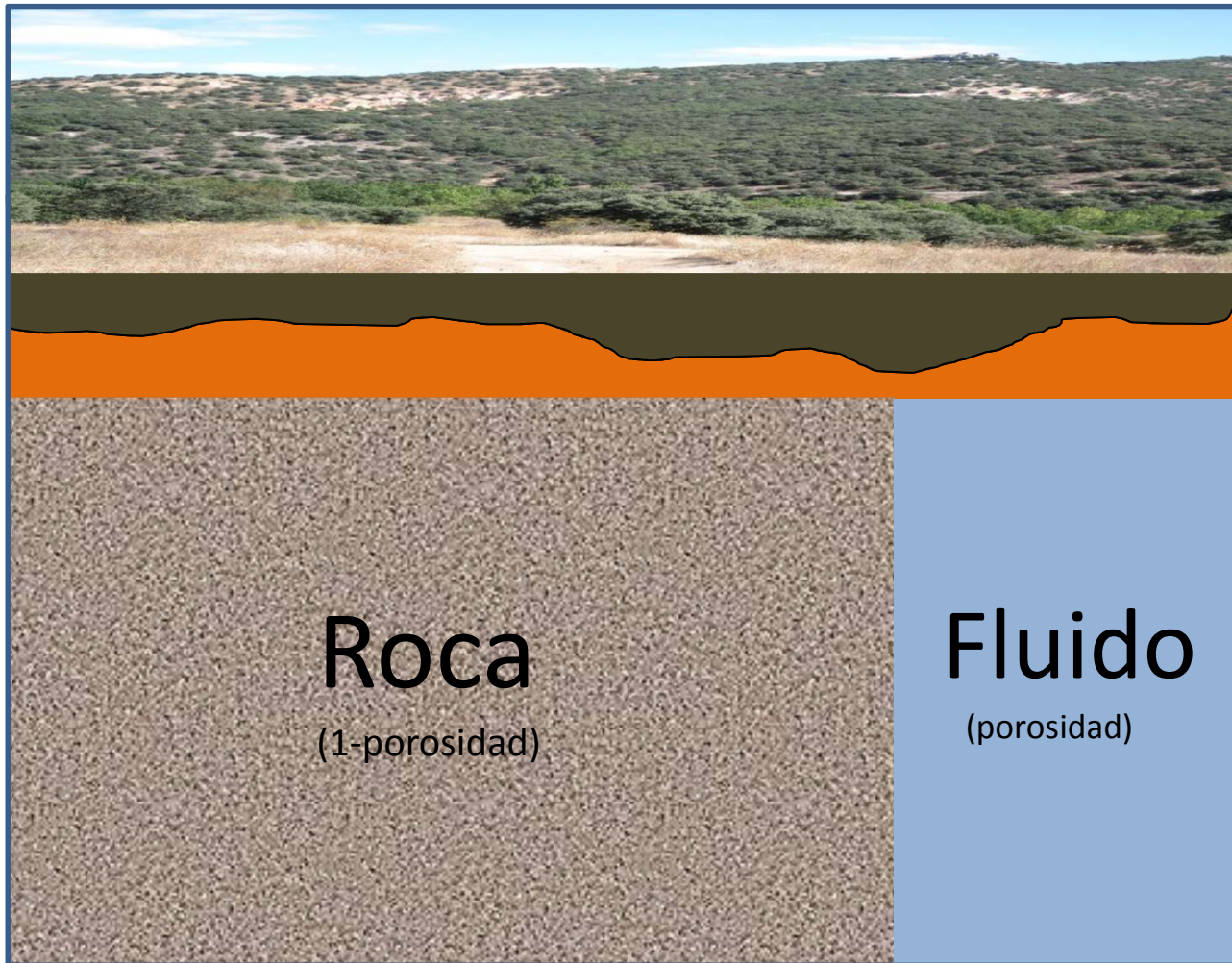
DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA

Método Volumétrico

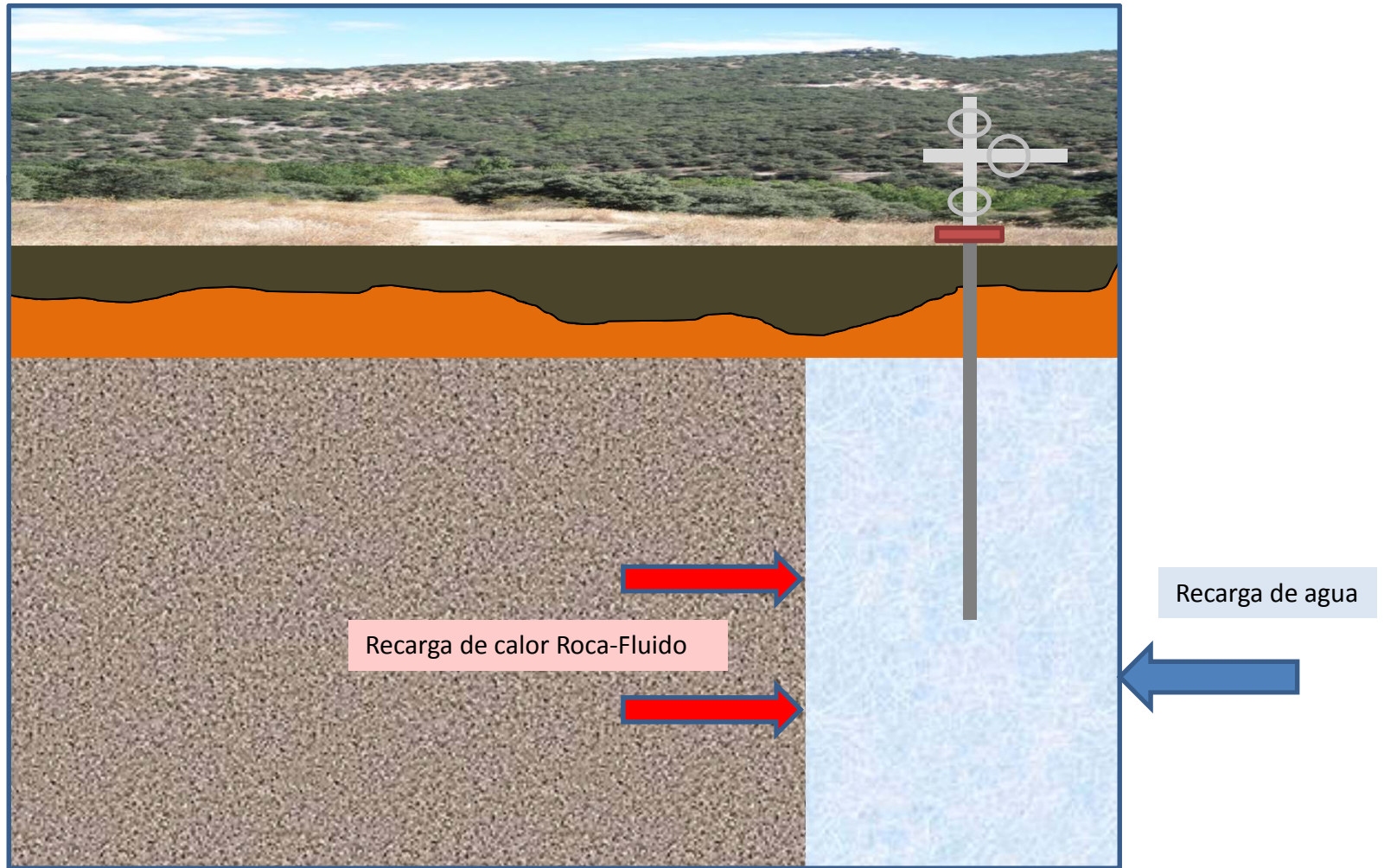


Modelo de Descompresión Gradual

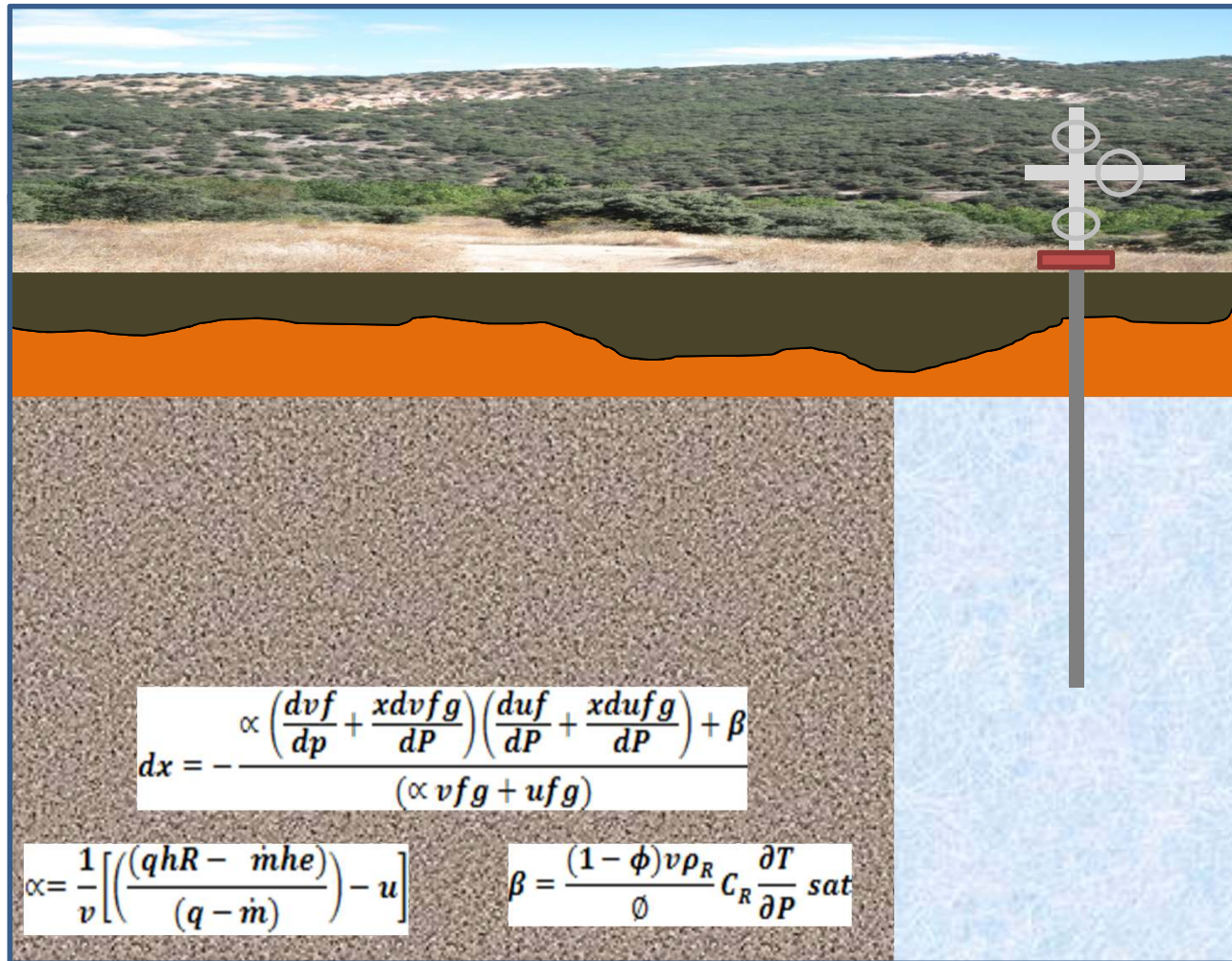
Con análisis Montecarlo para la simulación



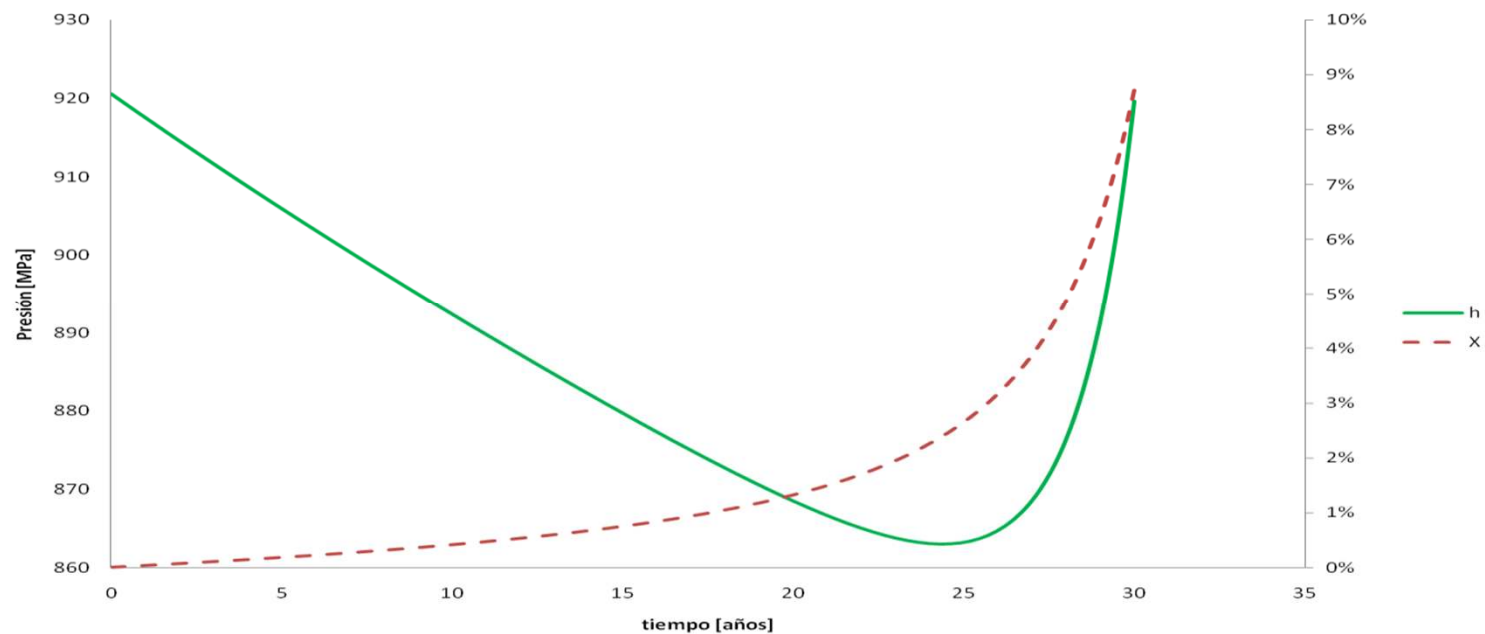
Modelo Descompresión Gradual



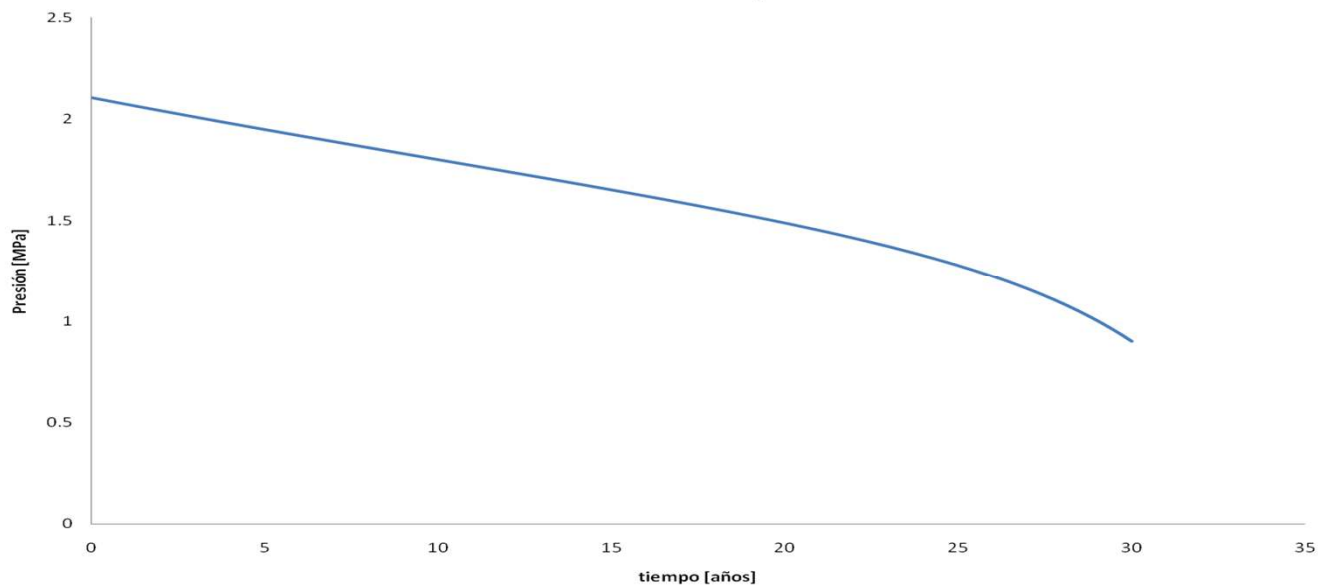
Modelo Descompresión Gradual



Entalpía y calidad de vapor en el yacimiento

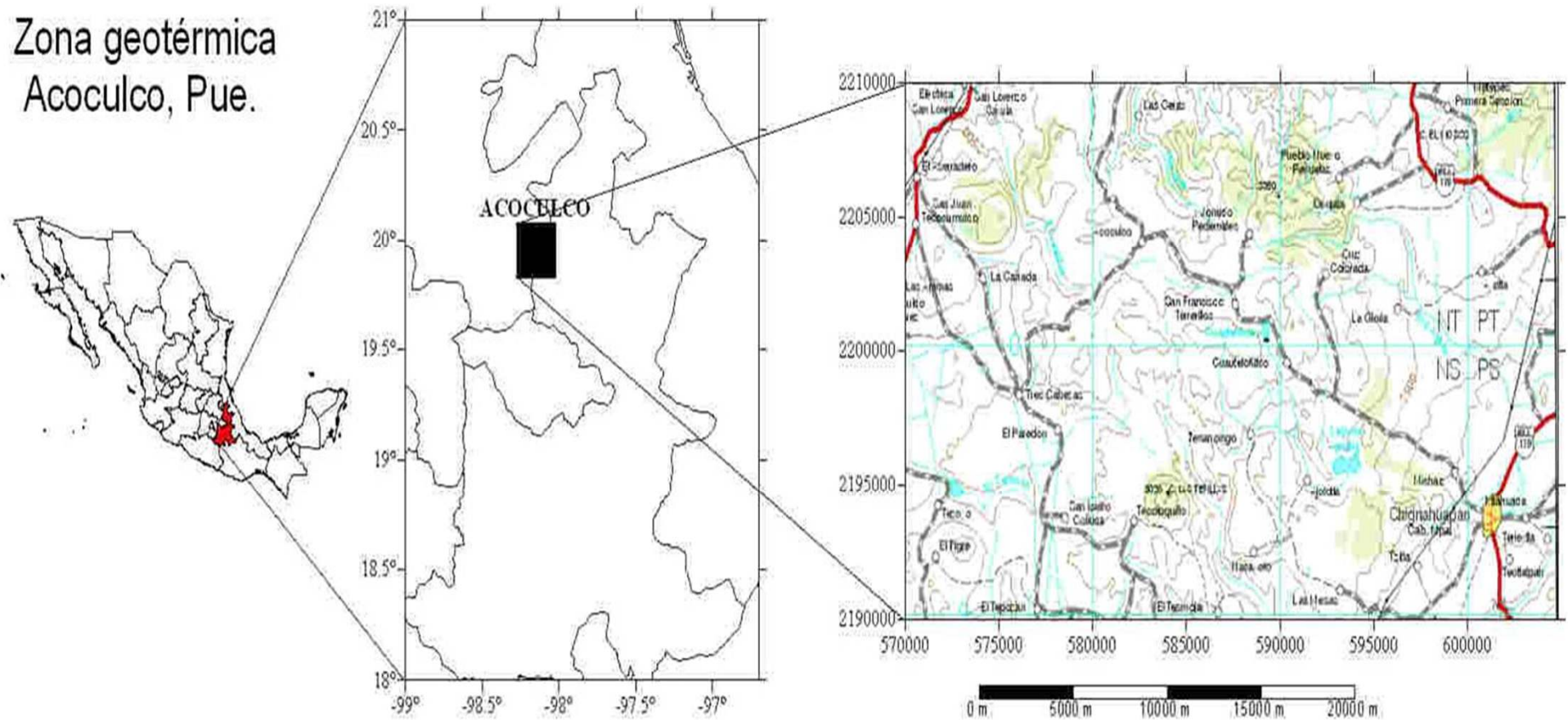


Presión de fondo en el yacimiento



Acoculco, Puebla

Zona geotérmica
Acoculco, Pue.



Descripción de la zona de Acoculco y referencias

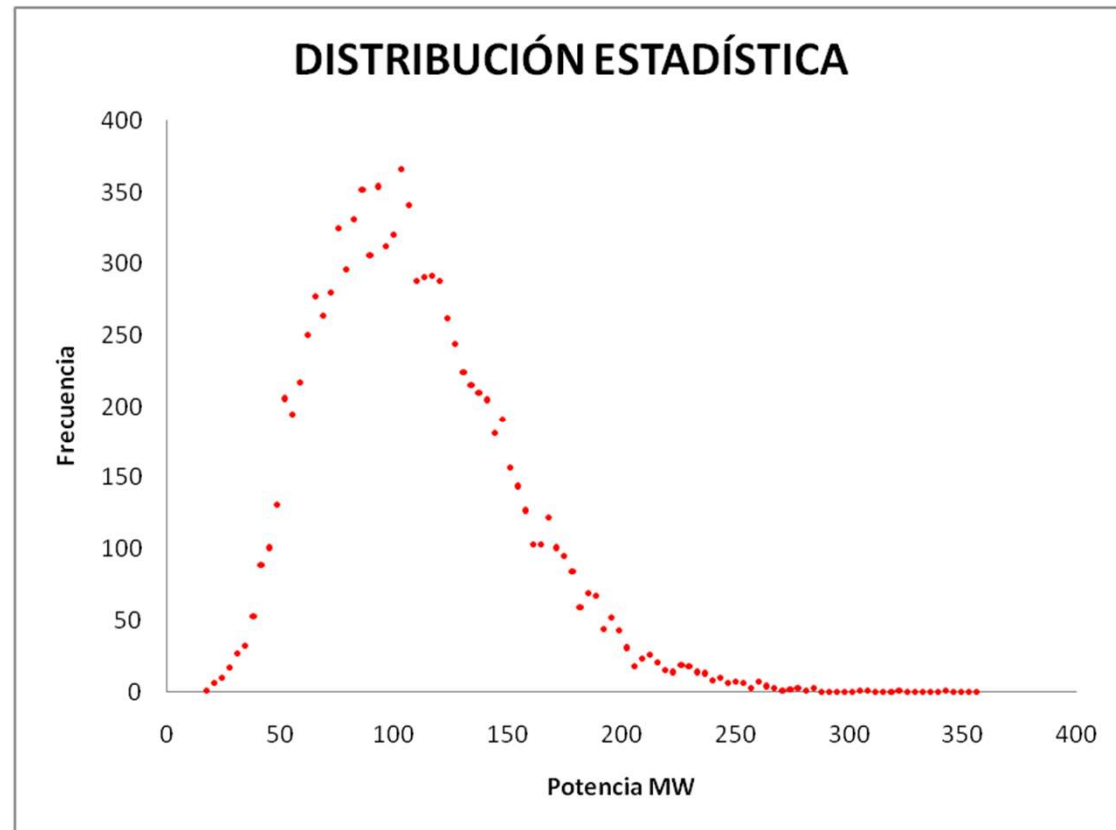
- **Localización**
- La zona se localiza casi en los límites de los estados de Puebla e Hidalgo, en el municipio de Chignahuapan, Pue., a 85 kilómetros al noroeste de la ciudad de Puebla y a 65 kilómetros al sureste de la ciudad de Pachuca Hgo., entre las coordenadas 19°47" y 20°02" de latitud norte y 97°55" y 98°20" de longitud oeste. Su elevación está entre los 2800 y 2900 msnm. Se tiene acceso a ella por las carreteras federales 199 y 132, a partir de las cuales se siguen diversas carreteras de terracería. Desde el punto de vista fisiográfico, está ubicada en la porción oriental de la Faja Volcánica Mexicana, muy cerca de los límites con la Sierra Madre Oriental.
- **Características**
- En la zona afloran rocas volcánicas de edad pliocénica y cuaternaria de composición andesítica y riolítica, así como algunos domos riolíticos. Los manantiales que afloran en ella son relativamente fríos, algunos de ellos con abundante desprendimiento de bióxido de carbono, así como algunas mofetas con temperaturas bajas asociadas con zonas de alteración hidrotermal (caolinización y silicificación) con elevadas concentraciones de boro (hasta 226 ppm). Incluye dos áreas de interés alteradas hidrotermalmente por fluidos de tipo ácido sulfatado, conocidas como Los Azufres-Potrero Colorado y La Alcaparroza. Ambas están asociadas a estructuras de dirección noroeste-sureste, aunque en la región la red estructural es muy compleja y presenta casi todas las orientaciones. Las aguas de los manantiales son de tipo sulfatado ácido y bicarbonatado sódico, probablemente originados por la mezcla de ácido sulfhídrico de origen geotérmico con agua superficial, y con temperaturas de fondo de casi 240°C según el geotermómetro de potasio-sodio. En algunos manantiales termales (49°C) de alrededor, a unos 18 kilómetros de las zonas alteradas, la temperatura de fondo se calculó en 273°C; estos manantiales se consideran como una probable descarga lateral del yacimiento geotérmico del subsuelo. Los gases son CO₂, H₂S, H₂, He, N₂, Ar, Ne, de origen magmático, y se ha encontrado una alta relación isotópica de He en los manantiales de Los Azufres (3He/4He = 8.5) considerada como una de las más altas de la Faja Volcánica Mexicana.
- De acuerdo con la litología encontrada en los dos pozos exploratorios profundos (1900 y 2000 metros de profundidad) perforados por la CFE, el probable yacimiento geotérmico podría estar contenido en las rocas calcáreas, parcial y localmente metamorfizadas a skarn, que subyace al paquete de rocas volcánicas, y probablemente también en el intrusivo (granito de hornblenda) cortado al fondo.
- En general, el probable yacimiento presenta altas temperaturas pero muy baja permeabilidad, por lo que la CFE considera esta zona como candidata para desarrollar en ella un sistema geotérmico mejorado (EGS: *Enhanced Geothermal System*) aplicando técnicas de fracturamiento hidráulico y/o químico
- **Estudios realizados**
- Se han efectuado estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos de detalle, y la CFE perforó dos pozos exploratorios: el EAC-1 en 1995 y el EAC-2 en 2008. En el primero (perforado a 2000 metros de profundidad) se midieron 307°C de temperatura, pero con permeabilidad prácticamente nula, aunque se detectaron dos zonas convectivas a 1250 y 1650 metros. En el segundo, perforado a 1900 metros de profundidad, se midieron 264°C de temperatura, se encontró la misma falta de permeabilidad y se detectaron igualmente dos probables zonas convectivas a 1550 y 1850 metros de profundidad. A la fecha la CFE planea realizar más estudios en la zona.
- **Potencial preliminar**
- Con el método Volumétrico-Montecarlo el campo presenta un potencial de **107 MW** con una desviación estándar de **42 MW** y el intervalo de confianza al 90% es de entre 38 y **177 MWe**.
- Con el método de descompresión gradual el campo presenta un potencial de **48 MW** y la evolución del yacimiento mostrada en las figuras 16 y 17.
- Los espesores probables del yacimiento se estimaron en función de la litología atravesada por los pozos exploratorios de la CFE, aunque el máximo podría ser superior a los 2 kilómetros indicados en la tabla. Para efectos del modelado se estima que aunque las porosidades y permeabilidades de las rocas calientes son muy bajas, ambas podrían ser estimuladas con fracturamiento hidráulico y/o químico para alcanzar valores artificiales suficientes para su explotación comercial con técnicas de sistemas geotérmicos mejorados.
- *Fuentes consultadas: Gutiérrez Negrín et al. (1989), Lorenzo Pulido et al. (2011), Viggiano Guerra et al. (2011), Acoculco, Puebla (Rocha et al., 2006).*

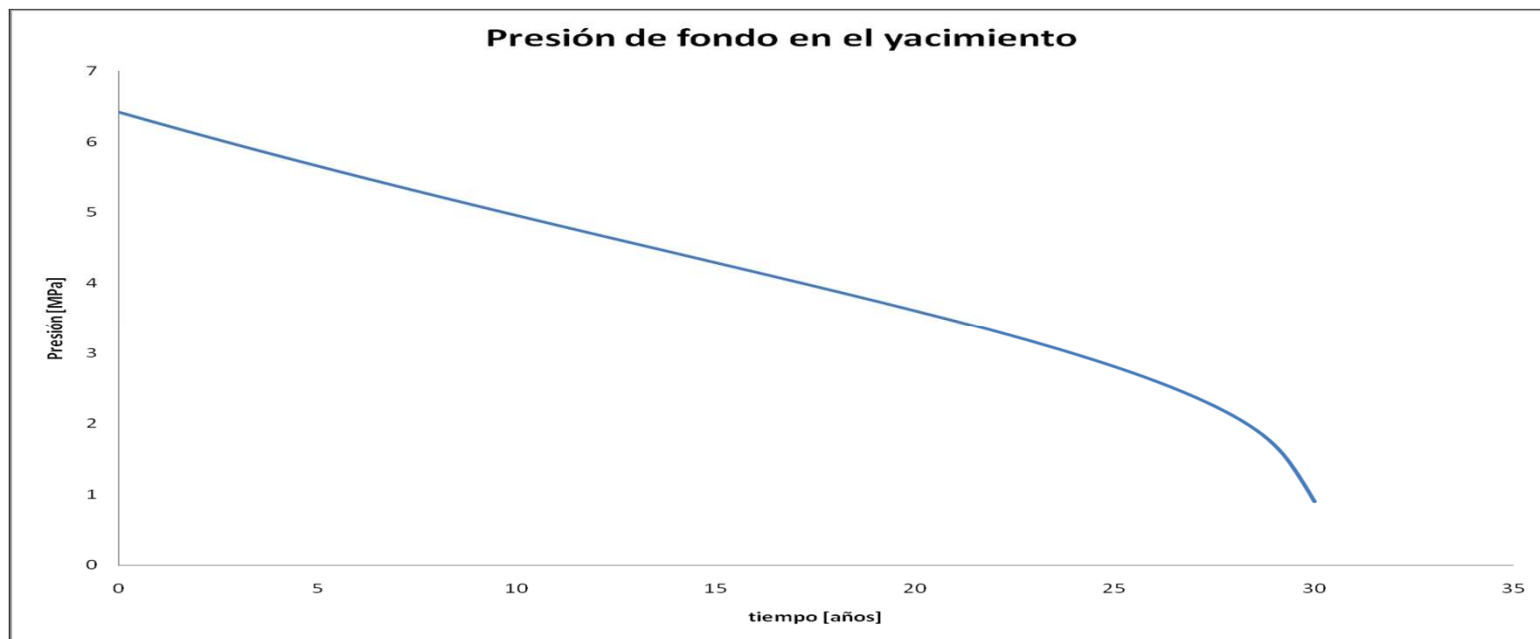
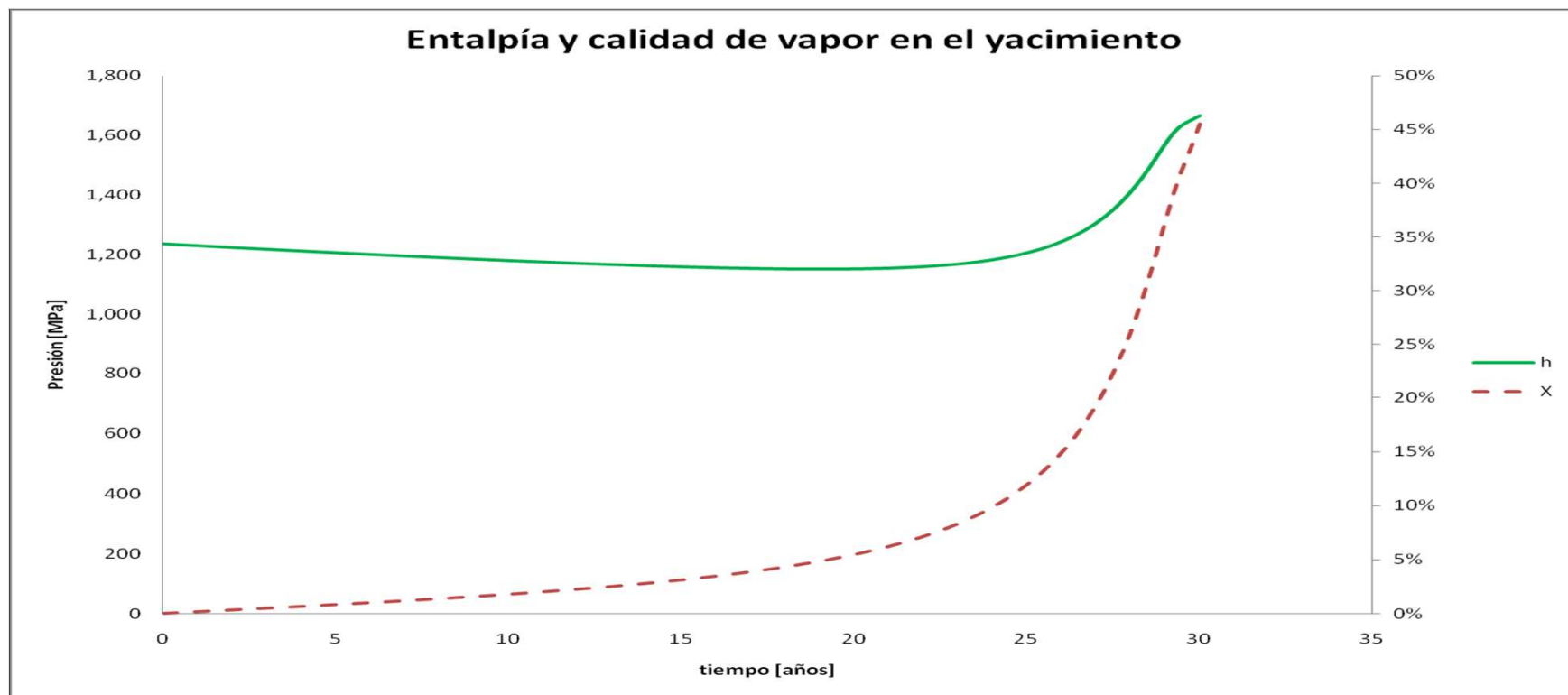
Acoculco, Puebla

Tabla resumen de datos específicos para este caso geotérmico

Acoculco, Puebla			
Parámetro	Valor mínimo	Valor esperado	Valor máximo
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km ²)	2	5	7
Espesor (km)	1.2	2	3
Temperatura del yacimiento (°C)	260	280	300
Temperatura ambiente (°C)	0	20	27
Humedad relativa (%)	48%	63%	78%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	4%	6%	8%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m ³)	2500	2700	2900
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.84	0.9	1.2
Factor de recuperación Rg (%)	5%	13%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (milidarcy, mD)	0.002	0.01	0.01

Acoculco, Pue. Método Volumétrico

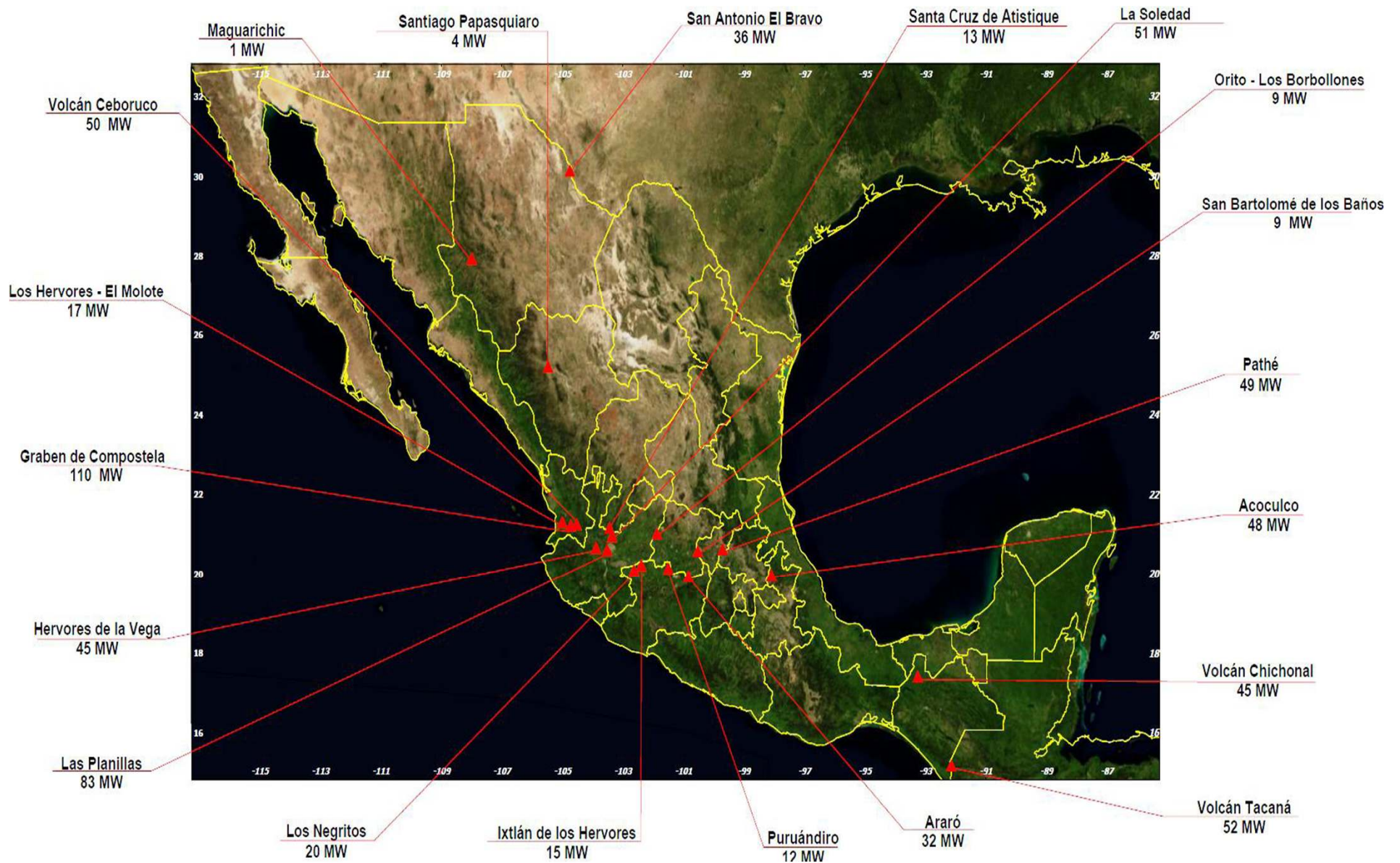




Gráficas
para una
Potencia
de 48 MW

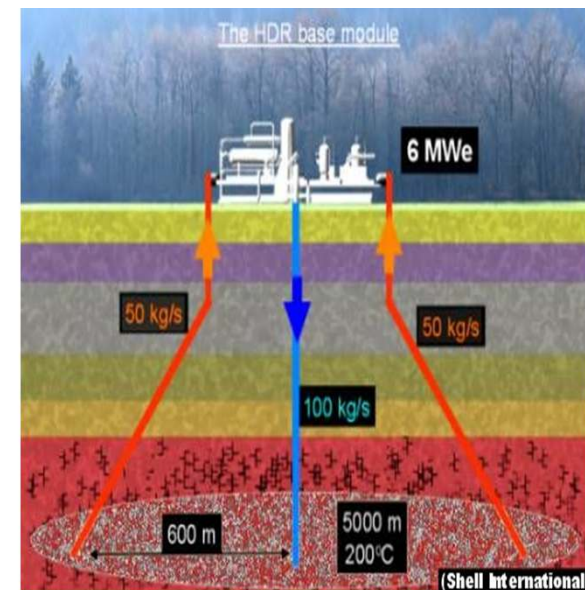
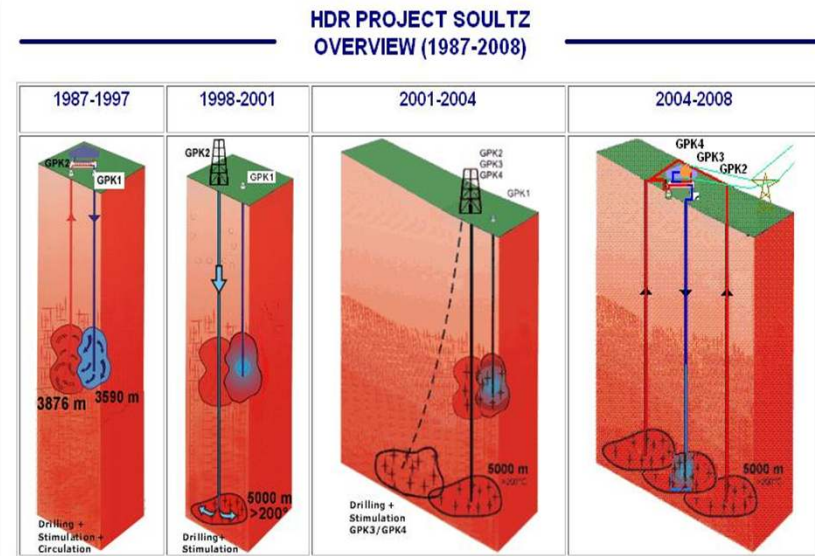
Zona geotérmica	Estado	Potencial estimado en MW		
		Modelo volumétrico*		Modelo de descompresión
		Valor probable	Rango (90%)	
1. La Soledad	Jalisco	52	10 – 94	51
2. Las Planillas	Jalisco	70	26 – 113	83
3. Pathé	Hidalgo	33	6 – 61	49
4. Araró	Michoacán	21	5 – 37	32
5. Acoculco	Puebla	107	38 – 177	48
6. Ixtlán de los Hervores	Michoacán	17	0 – 23	15
7. Los Negritos	Michoacán	24	3 – 44	20
8. Volcán Ceboruco	Nayarit	74	34 – 113	50
9. Graben de Compostela	Nayarit	105	35 – 175	110
10. San Antonio El Bravo (Ojinaga)	Chihuahua	27	10 – 43	36
11. Maguarichic	Chihuahua	1	0.2 – 1.7	1
12. Puruándiro	Michoacán	10	3 – 17	12
13. Volcán Tacaná	Chiapas	60	21 – 99	52
14. El Orito-Los Borbollones	Jalisco	11	1 – 21	9
15. Santa Cruz de Atistique	Jalisco	12	2 – 22	13
16. Volcán Chichonal	Chiapas	46	9 – 84	45
17. Hervores de la Vega	Jalisco	45	20 – 71	45
18. Los Hervores-El Molote	Nayarit	36	12 – 59	17
19. San Bartolomé de los Baños	Guanajuato	7	3 – 12	9
20. Santiago Papasquiaro	Durango	4	1 – 7	4
Total		762		701

Zonas Geotérmicas Analizadas en este Informe



EGS

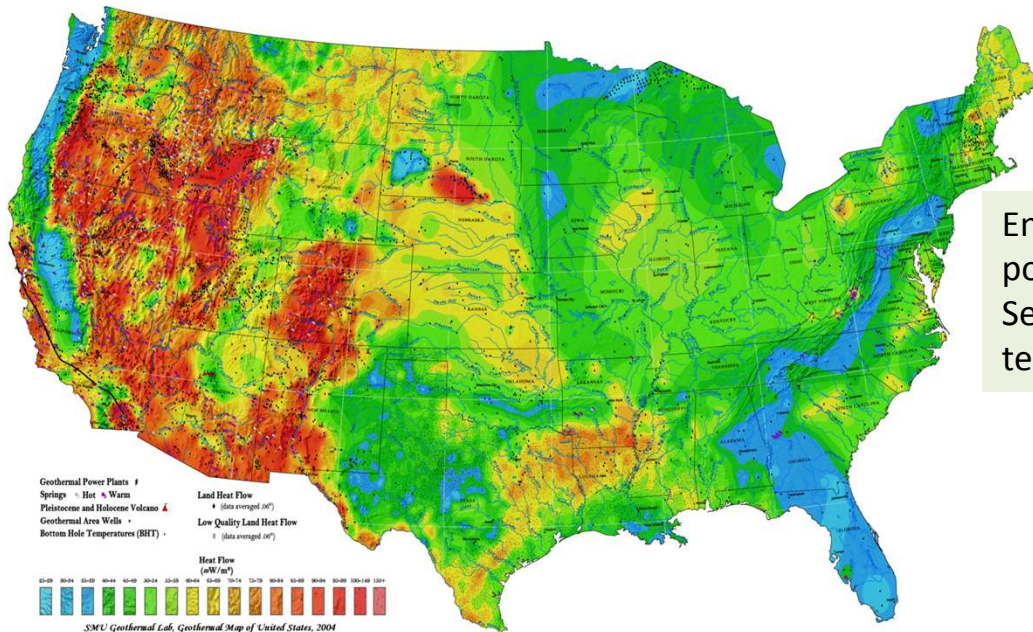
En el mundo se intensifica investigación para aprovechar calor de las rocas secas
 Planta de ciclo binario en Soultz, Francia; Precursora de tecnología de Roca Seca Caliente
 México tiene un gran potencial



Potencial de EGS en EEUU y México

En estados Unidos se tiene evaluado un potencial de más de **100 000 MWe** de EGS
Se trabaja en medición de flujo de calor terrestre

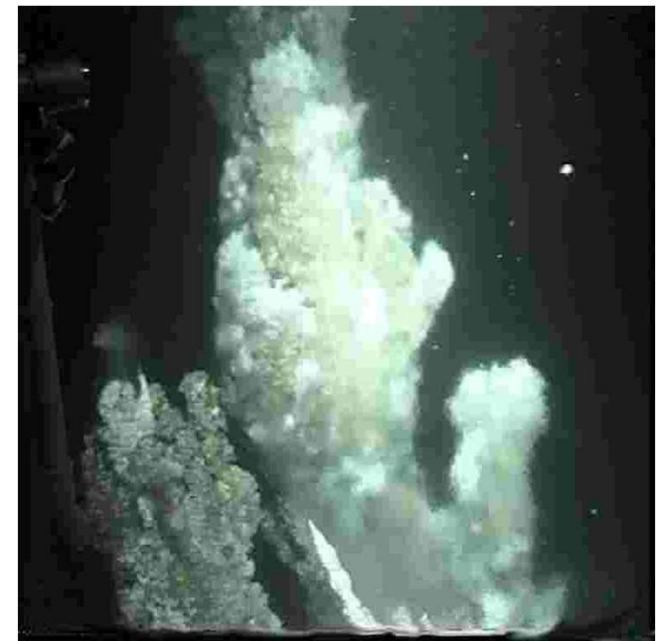
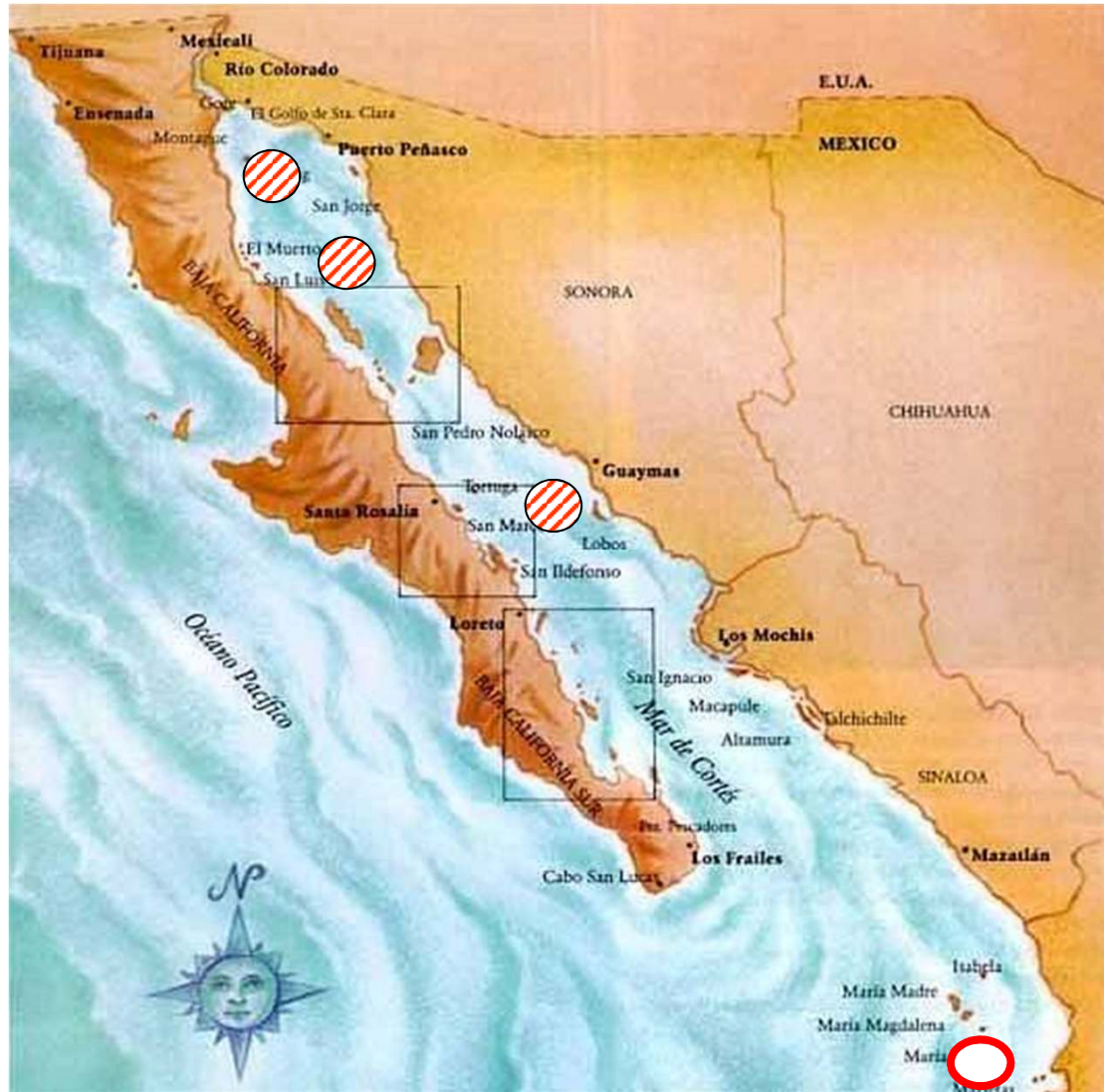
En México tiene un gran potencial;
Existen muy pocos estudios y mediciones de flujo de calor del suelo
Se requiere cuantificar y detectar zonas con buen potencial



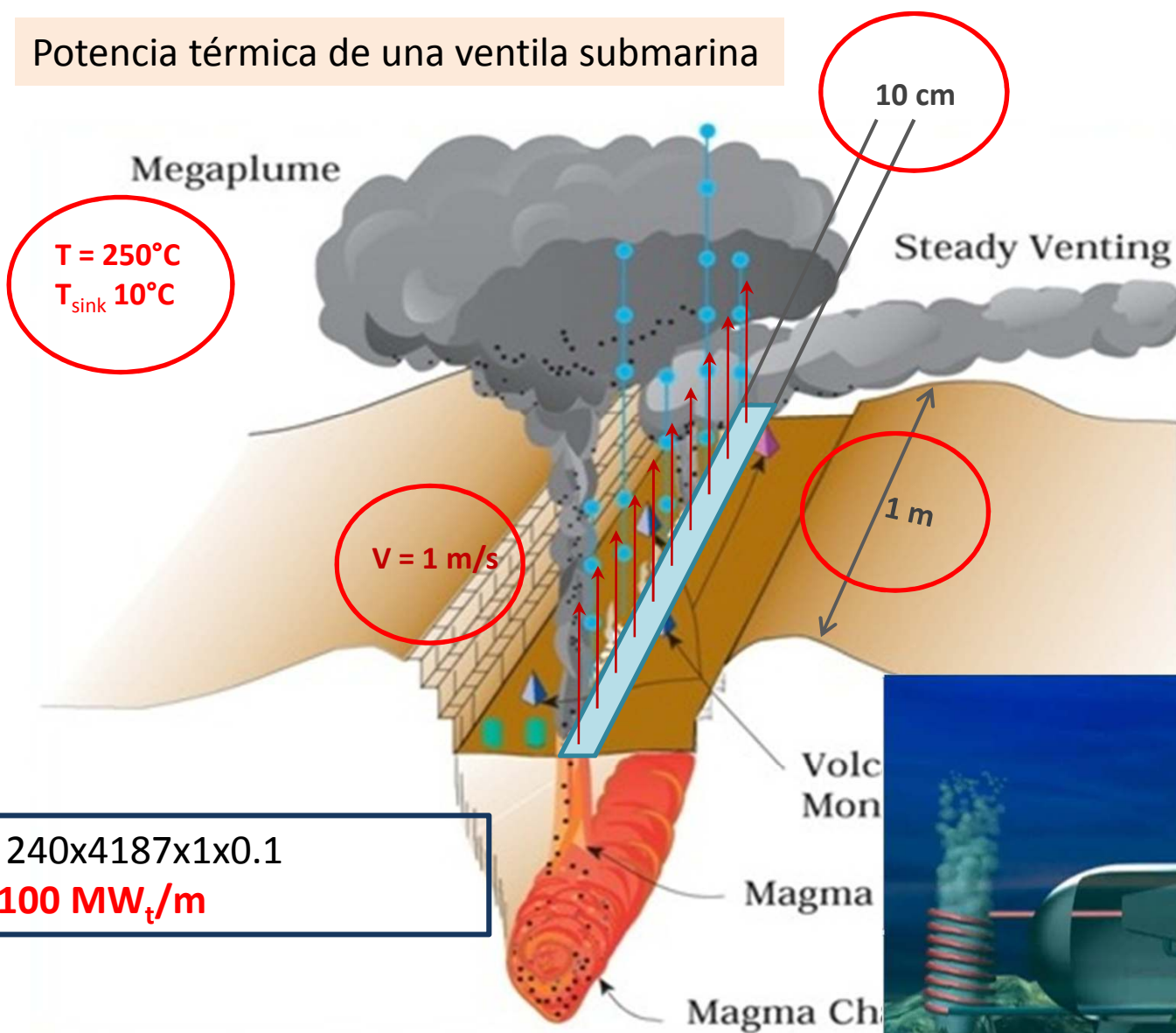
Potencial estimado para México en Roca seca Caliente con tecnología **EGS**

- Potencial geotermoeléctrico de México con recursos de roca seca caliente, susceptible de ser desarrollado con tecnologías de sistemas geotérmicos mejorados (EGS), es del orden de los **24,700 MW** para una profundidad máxima de 3000 metros.
- Este potencial técnico resulta ser 25 veces superior a la capacidad geotermoeléctrica instalada actual en el país, y alrededor del 48% de la capacidad eléctrica total instalada en México para el servicio público.

Sitios con potencial para geotermia submarina



Potencia térmica de una ventila submarina



$$Q = 240 \times 4187 \times 1 \times 0.1$$

$$= 100 \text{ MW}_t/\text{m}$$



Potencial de Geotermia Submarina en México

- Como conclusión muy preliminar y conservadora, se estima que en el potencial geotermoeléctrico con recursos hidrotermales submarino en el Golfo de California y en la plataforma continental de México es del orden de **1200 MW**.
- Este potencial debe considerarse como una estimación muy preliminar, que requiere ser medido y estudiado con más detalle.

TÉCNICAS DE EXPLORACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS

2.1. TÉCNICAS GEOLÓGICAS

2.2. TÉCNICAS GEOFÍSICAS

- 2.2.1. Métodos eléctricos

- 2.2.2. Métodos gravimétricos

- 2.2.3. Métodos magnetométricos

- 2.2.4. Métodos sismológicos

2.3. TÉCNICAS GEOQUÍMICAS

- 2.3.1. Detección de elementos traza y gases del suelo

- 2.3.2. Muestreo y análisis químico de agua y gases

- 2.3.3. Muestreo y análisis isotópico de agua y gases

- 2.3.4. Interpretación de los resultados y diagramas geoquímicos

- 2.3.5. Geotermometría química e isotópica

2.4. TÉCNICAS TERMOMÉTRICAS

- 2.4.1. Mediciones superficiales de radiación térmica

- 2.4.2. Mediciones sub-superficiales de temperatura

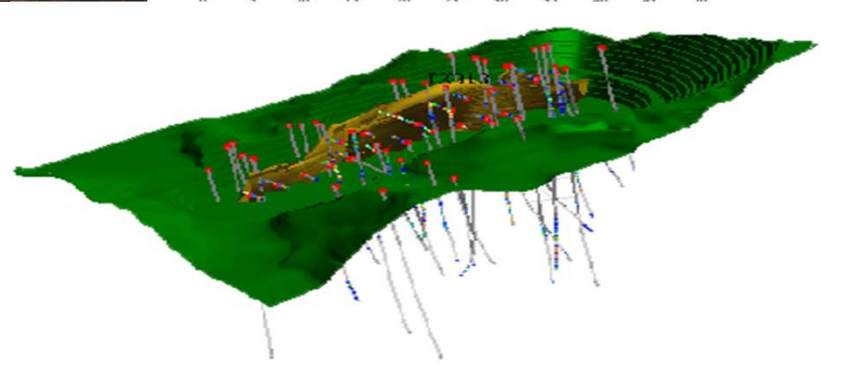
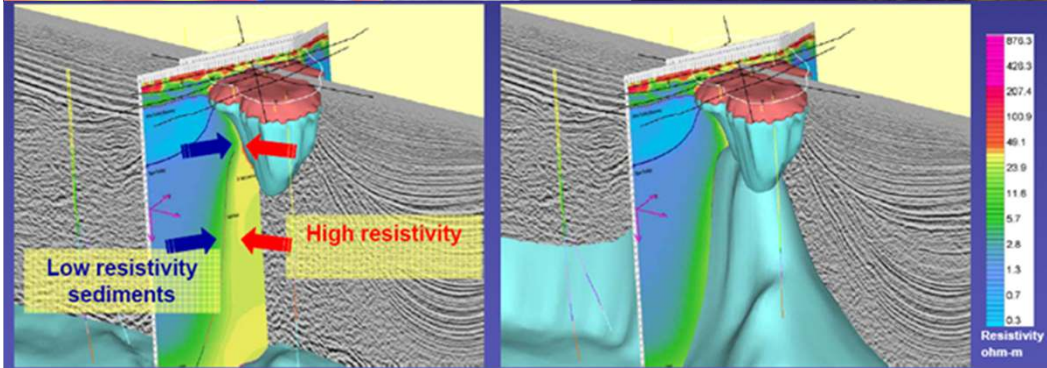
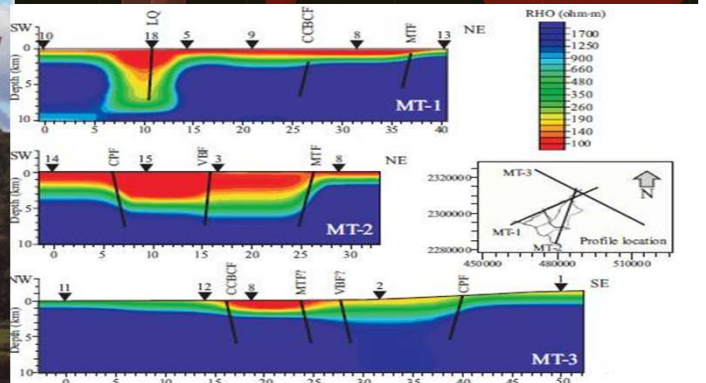
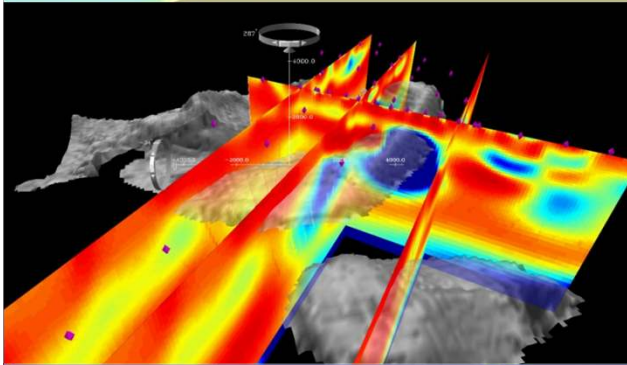
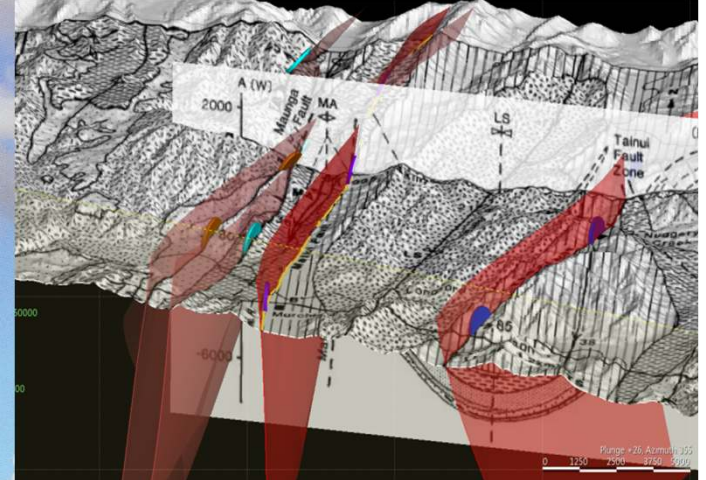
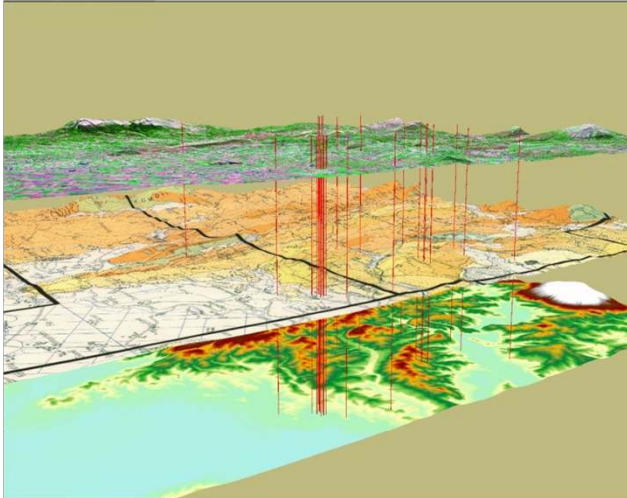
- 2.4.3. Medición de gradiente y flujo térmico en pozos

- 2.4.4. Determinación de la descarga natural de calor

2.5. NUEVAS TECNOLOGÍAS DE EXPLORACIÓN

2.6. PROGRAMA GENERAL DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

Nuevas tecnologías de exploración



ASPECTOS LEGALES DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO

3.1. ASPECTOS DE DERECHO COMPARADO EN MATERIA DE GEOTERMIA

3.2. SITUACIÓN JURÍDICA DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO

3.3. LOS RECURSOS NATURALES EN LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS.

3.3.1. La Reglamentación Constitucional del Subsuelo.

3.3.2. Régimen Constitucional de las Aguas del Subsuelo.

3.3.3. La Ley de Aguas Nacionales.

3.4. ESTADO JURÍDICO DE LA GEOTERMIA EN MÉXICO

3.5. LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON GEOTERMIA

3.5.1. Titularidad de la propiedad

3.5.2. Autorizaciones federales con diferentes dependencias en materia ambiental

3.5.3. En materia de agua

3.5.4. De otras secretarías de estado

3.5.5. Estatales o municipales

3.5.6. Comisión reguladora de energía

3.6. CONCLUSIÓN

La legislación mexicana para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos es muy escueta y con muchos vacíos

En efecto, el artículo 81 de la Ley de Aguas Nacionales determina que:

“La explotación, el uso o aprovechamiento de aguas del subsuelo en estado de vapor o con temperatura superior a ochenta grados centígrados, cuando se pueda afectar un acuífero, requerirán de la concesión previa para generación geotérmica u otros usos, además de evaluar el impacto ambiental”.

A su vez el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, en su dispositivo 126 ordena:

“El uso de agua en estado de vapor para la generación de energía eléctrica y el uso de agua para enfriamiento se considerará uso industrial.”.

Se exponen de manera sinóptica, las autorizaciones, requeridas para la explotación geotermoeléctrica, haciéndose hincapié en que cualquier otro uso paralelo o alternativo de la geotermia, se encontraría comprendido en el indicado catálogo

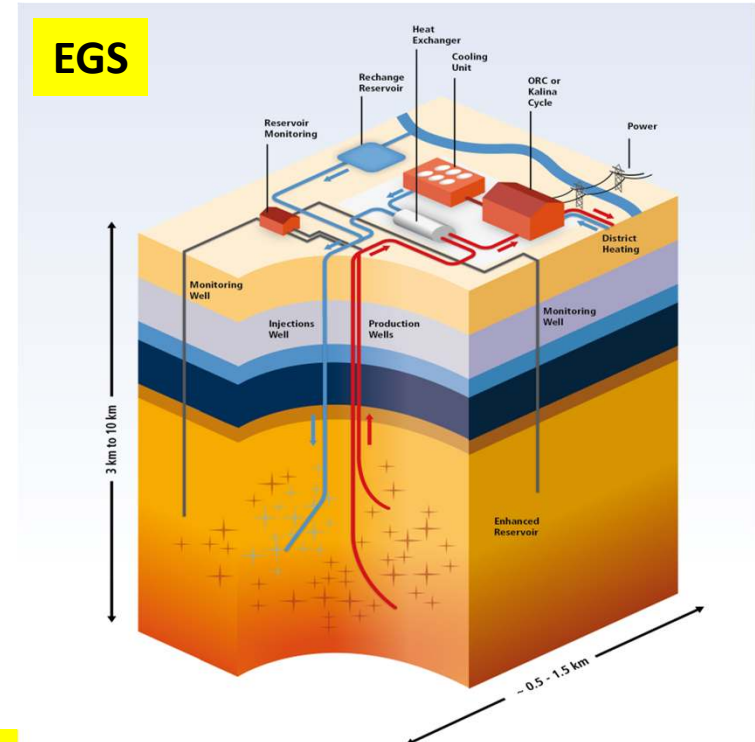
Ejemplo ilustrativo

3.5.2. Autorizaciones federales con diferentes dependencias en materia ambiental	Dependencia	Descripción/Fundamento Jurídico	Plazo de resolución	Etapas/Observaciones
Autorización o Requisito Autorización en Materia de Impacto Ambiental	SEMARNAT/SGPA	Autorización para llevar a cabo actividades u obras que puedan causar desequilibrio ecológico. Art. 28 fr II y Art. 30 de LGEEPA	60 días hábiles (60 días hábiles más, en caso de requerirse información adicional) 60 días ampliación del plazo	Observar y aplicar las medidas de preservación, mitigación y compensación de impactos ambientales establecidos en el documento de Manifestación de Impacto Ambiental y en la Autorización de la Autoridad Ambiental.

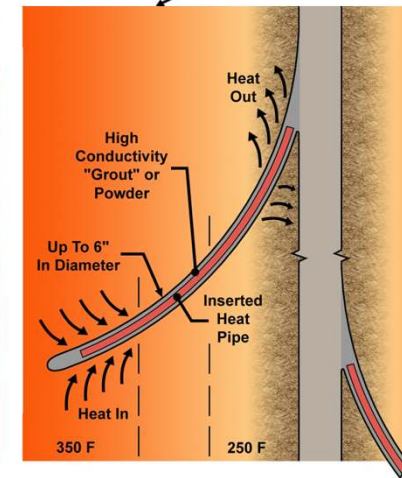
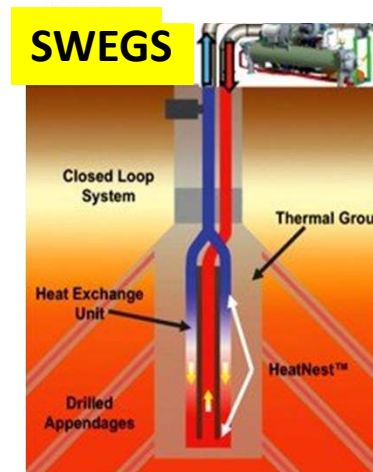
Tecnologías geotérmicas en las que no se extrae agua del acuífero



Binarias pequeñas



Submarina



Conclusiones y Recomendaciones

(explícitas e implícitas)

- Informe describe el procedimiento para permisos con legislación actual
- Recomendación dar certeza jurídica a la inversión en geotermia: Necesario revisar la legislación mexicana, compararla con la de los países que ya tienen leyes modernas sobre el tema y producir un documento borrador para ser sometido al legislativo
(Ya existen varios intentos que han aportado buena información)
- Incluir en el documento aspectos que no son asociados la extracción de agua de los acuíferos tales como
 - Roca Seca Caliente (EGS),
 - extracción de calor de acuíferos (SWEGS),
 - gases calientes asociados al petróleo,
 - ventilas submarinas,
 - agua de mar caliente,
 - algunos casos de ciclo binario y
 - los minerales disueltos en las salmueras
- Evitar interferencias subterráneas con explotaciones en zonas vecinas
- Evitar acaparamientos y especulaciones
- Aprovechar los fondos de la SENER para Sustentabilidad Energética para desarrollar los estudios necesarios con Centros de Investigaciones Jurídicas y la propia CRE



Muchas gracias por su atención

ghiriart@enal.com.mx