

Evaluación volumétrica del potencial geotérmico del Volcán Chichonal, Chis.

Abraham III Molina Martínez

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Alejandro Volta 655, Morelia, 58090, Mich. Correo: abraham.molina@cfe.gob.mx

Resumen

Una de las zonas geotérmicas de interés en México es el Volcán Chichonal, ubicado en el estado de Chiapas, cuyo potencial preliminar se evaluó con el método volumétrico y con la simulación de Monte Carlo. Los resultados se presentan como una distribución de probabilidad discreta y como una distribución de probabilidad acumulativa. Para este estudio se simularon tres escenarios operacionales cubriendo los periodos de 20, 25 y 30 años. Cada simulación se compone de 10,000 resultados al azar. A partir de estos resultados se pueden calcular parámetros estadísticos diferentes, como los valores más probables, el intervalo de confianza del 90%, los resultados promedio y la mediana, la desviación estándar y dónde está el límite del 90% de la función de probabilidad acumulativa. De acuerdo con los resultados del modelo volumétrico, se predice con un 90% de confianza que el potencial geotérmico del sitio se encuentra entre 27 y 61 MWe para un periodo de 20 años, entre 22 y 45 MWe para un periodo de 25 años y entre 18 y 40 MWe para un periodo de 30 años. Además, la evaluación volumétrica del potencial geotérmico utilizando el método Monte Carlo muestra que existe un 90% de probabilidad de que el potencial eléctrico pueda ser al menos de 29 MWe para un periodo de 20 años, de 23 MWe para un periodo de 25 años y de 19 MWe para un periodo de 30 años.

Palabras clave: Volcán Chichonal, potencial geotermoeléctrico, modelo volumétrico, método Monte Carlo.

Antecedentes

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos pretende incrementar su potencial geotérmico para generación de energía eléctrica. Para ello se realizan estudios de exploración geológica, geofísica y geoquímica en diferentes partes de la república con el fin de identificar zonas con potencial geotérmico de alta, media y baja entalpía. Una de las zonas que han sido estudiadas es el Volcán Chichonal, la cual se pretende evaluar con el método volumétrico y estimar su potencial geotérmico con la simulación de Monte Carlo.

Desde 1980 se han realizado estudios de geología y geoquímica en el estado de Chiapas y se han identificado zonas de manifestaciones termales que indican que la zona del volcán presenta condiciones favorables de la existencia de recursos de alta entalpía. A finales de marzo de 1982 el Volcán Chichonal hizo erupción, y posteriormente numerosas instituciones académicas se han dedicado a estudiarlo, principalmente desde el punto de vista de riesgo volcánico. Recientemente la CFE-GPG ha realizado estudios en la zona con el objeto de localizar pozos exploratorios que confirmen la existencia y probable extensión del recurso. Con la evaluación geoquímica, y específicamente con geotermómetros, se han estimado temperaturas que van 230°C a 260°C, indicando condiciones favorables para su explotación.

Características generales

Para elaborar un modelo conceptual geotérmico de esta zona se requiere un conocimiento adecuado sobre la evolución de su cámara magmática en el tiempo (fuente de calor), configurar un estilo

estructural y litológico donde se aloje el yacimiento, una fuente de recarga y determinar los límites del yacimiento. En este estudio se emplearon los métodos de exploración geológica superficial (cartografía, morfología, vulcanología, petrografía, geoquímica, geología estructural) y geoquímica de fluidos para desarrollar un modelo conceptual.

Localización

El proyecto geotérmico del Volcán Chichonal se localiza en la porción noroeste del estado de Chiapas, a unos 70 km al norte de Tuxtla Gutiérrez, formando parte del Arco Volcánico Chiapaneco (AVC).

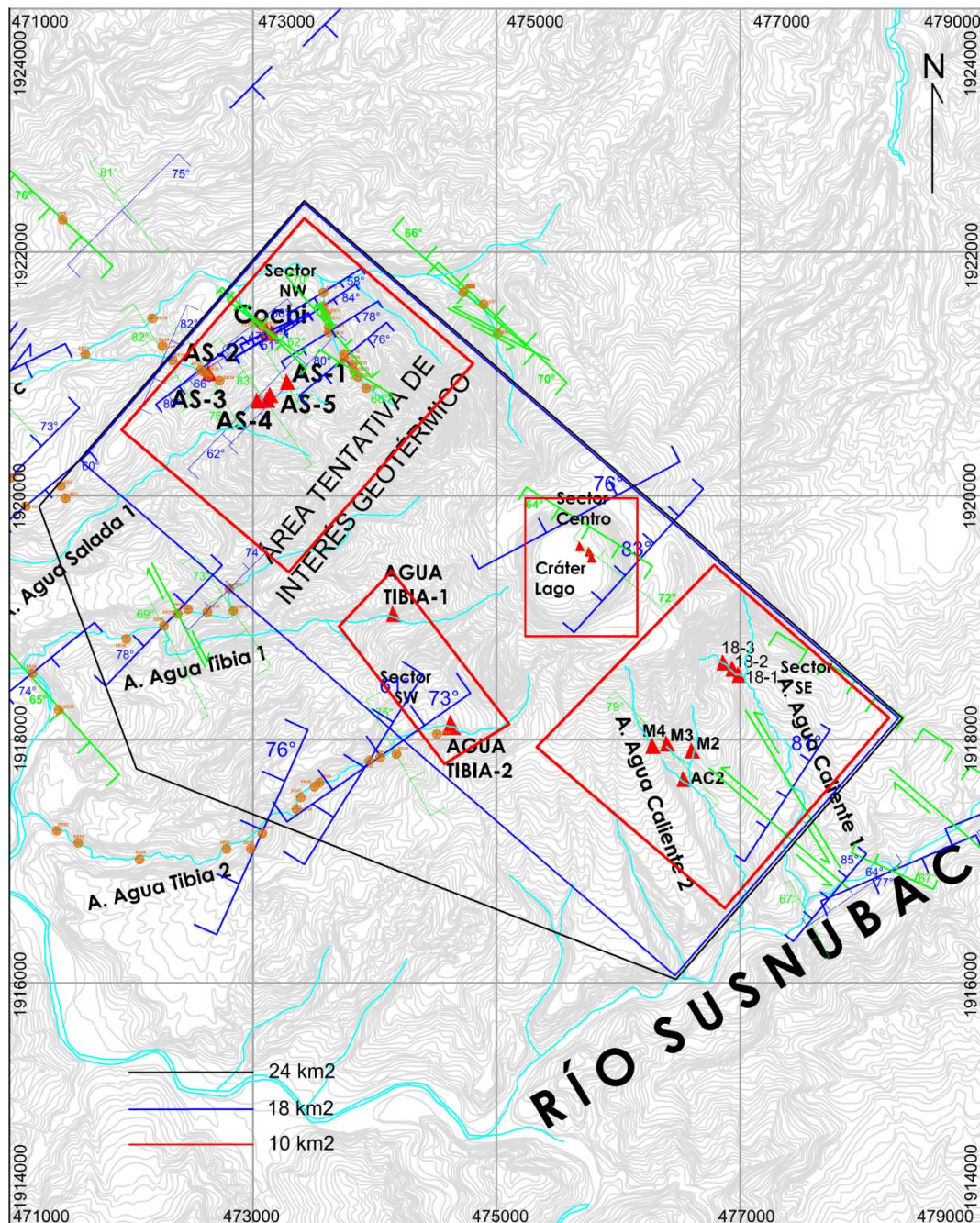


Figura 1. Localización del área del proyecto geotérmico del Volcán Chichonal.

Marco geológico y geoquímico

Localmente el volcán está emplazado en un basamento de rocas sedimentarias que incluye evaporitas del Jurásico, calizas del Cretácico y areniscas y lutitas del Terciario. El Chichonal es un volcán activo compuesto por un cráter de 1.5 por 2 km de diámetro denominado Somma, que alcanza una elevación de 1150 msnm. Su origen está relacionado a la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica a lo largo de la trinchera Mesoamericana.

Mediante dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de los productos volcánicos del complejo se definieron seis unidades volcánicas que datan desde hace 276 000 años a productos de erupciones recientes. Con base en los análisis petrográficos y geoquímicos se determinó que los magmas máficos del complejo volcánico de El Chichonal evolucionan y se estacionan a una profundidad de 6 a 7 km con temperaturas de 750 a 880°C para dar origen a magmas intermedios mediante cristalización fraccionada y contaminación cortical.

La secuencia sedimentaria está deformada por plegamientos que componen los anticlinales de orientación NW-SE de La Unión y Caimba y el sinclinal Buena Vista. El Colcán Chichonal se encuentra emplazado en el sinclinal Buena Vista del Mioceno Inferior. Desde el punto de vista tectónico, el complejo volcánico está situado dentro de la Provincia de Fallas Laterales Motagua-Polochic. Las rocas del basamento están afectadas por fallas orientadas E-W con movimiento lateral izquierdo, como la Falla San Juan, y por fallas normales de rumbo NE-SW, con planos buzando en dirección NW. Desde el punto de vista estructural se infiere que la actividad hidrotermal está controlada por una estructura de orientación NW-SE denominada Catedral-Chichón.

Las manifestaciones termales consisten de manantiales, fumarolas y hervideros distribuidos en cuatro sectores del volcán. En el sector SE destacan los manantiales de Agua Caliente 1 y 2, mientras que en el sector SW se observan los manantiales de Agua Tibia 1 y 2, y en el sector NW los manantiales y fumarolas de Agua Salada 1, 2 y El Cochi. El sector Chichón se caracteriza por contener los manantiales y hervideros al interior del cráter-lago; estas manifestaciones indican la existencia de un sistema geotérmico profundo con temperaturas de 230°C calculadas con el geotermómetro Na/K y una temperatura para gases de 260°C por medio del geotermómetro H_2/Ar . Se infiere que el yacimiento geotérmico podría estar alojado en las calizas del Cretácico. Es posible observar e identificar que las manifestaciones termales al NW del Volcán Chichonal emanan del fracturamiento y fallamiento con rumbo NW-SE en contacto con rocas de composición traquiandesíticas y al SE-SW los manantiales brotan del contacto litológico de la cima de la secuencia de lutitas con los productos piroclásticos de origen reciente.

Limites del yacimiento (zona de interés geotérmico).

De acuerdo a los análisis geológicos y geoquímicos se obtuvo un área de interés geotérmico delimitada al SE por las fallas del Río Susnubac de orientación NE-SW con buzamiento al NW. Al NW se encuentra delimitada por la falla de orientación NE-SW y buzamiento al SE que corre a través del arroyo Cambac y al NE por la falla denominada Chichón-Catedral de orientación NW-SE con buzamiento al SW. Estas estructuras rigen el termalismo superficial de la zona resultando un área de 18,1 km² con orientación preferencial NW-SE como se muestra en la Figura 1. Las características termales en el área de estudio, indican la existencia de una fuente de calor de alta temperatura (Arellano et al., 2010 y Sandoval et al., 2010).

Los parámetros a utilizar para el cálculo volumétrico en la zona de interés geotérmico fueron obtenidos de información de estudios de geología y geoquímica realizados en la zona. Para definir el espesor del yacimiento se consideró la litología proporcionada por PEMEX de los pozos perforados a finales de los años 70 en los alrededores del complejo volcánico, los cuales son el pozo

Caimba-12 que se encuentra ubicado a 5 km al NE del Volcán Chichonal, perforado en la zona del rancho San Juan, y los pozos Unión-1, Unión-2 y Unión-3 que se encuentran ubicados a 6 km al W del volcán y cercanos a los poblados de Xochimilco y Candelaria. La información litológica obtenida de estos pozos se correlacionó para determinar el posible espesor del yacimiento que se calcula en aproximadamente 1000 m y que se encuentra alojado en las calizas por tener mayor permeabilidad que las rocas que la subyacen (lutitas).

Parámetros petrofísicos y termodinámicos para el modelo volumétrico

Para este trabajo los parámetros de porosidad, densidad y calor específico de las calizas se obtuvieron de tablas que se encuentran en la literatura de rocas y materiales de construcción (de Winkler, 1973; Komar, 1987), ya que para esta área en particular no se cuenta con datos de laboratorio para este tipo de roca.

La temperatura en el subsuelo se obtuvo a partir de la geotermometría de la fase gaseosa en 260°C, que es la más alta obtenida con el geotermómetro H₂/Ar. La temperatura de referencia podría ser la temperatura ambiente, pero en nuestro caso es la temperatura mínima para producción de electricidad. La densidad del fluido y el calor específico del mismo se obtuvieron de las tablas de vapor. El parámetro (t) es el tiempo en años del escenario de simulación y los parámetros factor de recuperación, factor de planta y factor de eficiencia se obtuvieron de la literatura (Grant et al., 1982).

Métodos aplicados

Cálculo volumétrico

El cálculo volumétrico es el método más utilizado para estimar la energía térmica contenida en un sistema geotérmico. En el desarrollo de este trabajo se consideró el yacimiento o sistema geotérmico como una caja, donde el volumen es el producto del área (A) en el plano x-y y la altura es el espesor del mismo (h). Por simplicidad se asumió que la capacidad de calor y la temperatura son homogéneas en el plano x-y-z. Así la energía contenida en el sistema geotérmico es calculada con las siguientes tres ecuaciones:

$$Q_r = Ah(1 - \phi)\rho_r c_r (T_i - T_0) \quad (1)$$

$$Q_f = Ah\phi\rho_f c_f (T_i - T_0) \quad (2)$$

$$Q_t = Q_r + Q_f \quad (3)$$

Donde

Q_t = Energía total o térmica	ρ_r = Densidad de la roca
Q_r = Energía de la roca	ρ_f = Densidad del fluido
Q_f = Energía del fluido	c_r = Calor específico de la roca
A = Área	c_f = Densidad de la roca
h = Espesor del yacimiento	T_i = Temperatura inicial del yacimiento
ϕ = Porosidad	T_0 = Temperatura de abandono del yacimiento

Ahora bien, como no toda la energía térmica contenida en el sistema geotérmico puede ser extraída a la superficie, la energía térmica estimada es reducida por un factor de recuperación (R) que es el calor recuperable. Además, como no toda la energía recuperable puede ser transformada en energía eléctrica se reduce por un factor de conversión de eficiencia (η_e) como se muestra en la ecuación 4:

$$Q_e = Q_t R \eta_e \quad (4)$$

Donde

Q_e = Energía eléctrica

η_e = Factor de conversión de eficiencia

R = Factor de recuperación

Por último esta energía eléctrica se convierte en energía potencial en unidades de megawatts eléctricos (MWe). Cabe hacer mención que aquí interviene un factor de planta y tiempo en años del proyecto, de acuerdo con la ecuación 5:

$$P = \frac{Q_e}{F_p t} \quad (5)$$

Donde

F_p = Factor de planta

t = tiempo en años

Simulación Monte Carlo

El método Monte Carlo (MC) utiliza técnicas estocásticas que se basan en el uso de números al azar y en estadísticas de probabilidad para investigar problemas. Este método se utiliza a menudo cuando el modelo es complejo y no lineal o implica algo más que un par de parámetros inciertos. El método utiliza diferentes aproximaciones, pero todas ellas tienden a seguir un patrón particular. El requisito principal para usar este método para la simulación de un sistema físico es que debe ser posible describir el sistema en términos de una función de densidad de probabilidad (PDF). Este método tiene la intención de determinar la variación aleatoria, la falta de conocimiento o la manera en que el error afecta a la sensibilidad, el rendimiento o la confiabilidad del sistema que se está modelando. En otras palabras, cuantifica las incertidumbres de los parámetros en distribuciones de probabilidad.

Los valores mínimo, máximo y más probable se asignan para cada parámetro, que definen una función de distribución (Tabla 1). Esto se hace debido a la incertidumbre de las variables y se prefiere sobre el enfoque habitual determinista que supone un valor único para cada parámetro para representar el yacimiento entero. En lugar de asignar un valor “fijo” a un parámetro del yacimiento, los números dentro de un rango del modelo de distribución son seleccionados al azar y escogidos para cada ciclo de cálculo sobre miles de iteraciones. Una simulación de Monte Carlo controla este escenario complejo, que permite la extracción de cada variable incierta en el lapso de un mínimo, un valor más probable y un valor máximo (distribución triangular). El muestreo al azar y los cálculos se hacen por miles de iteraciones y cada resultado es enviado para ser compilado en la distribución de frecuencias. Al conocer el alcance del mínimo, los valores más probable y máximo de los diferentes parámetros de entrada, se puede evaluar el riesgo y la probabilidad de ocurrencia cuando se tome una decisión sobre el nivel de generación (Molina, 2009).

Parametros	Variable	Tipo de distribución	Valor mínimo	Valor más probable	Valor máximo
Area	A	Distribución triangular	10 km ²	18 km ²	24 km ²
Espesor	h	Distribución triangular	500 m	800 m	1000 m
Temperatura inicial	T_i	Distribución triangular	230 °C	250 °C	260 °C
Temperatura de referencia	T_0	Constante	N/A	180 °C	N/A
Porosidad	f	Distribución triangular	5%	12%	20%
Calor específico de la roca	c_r	Constante	N/A	0.9 (kJ/kg°C)	N/A
Densidad de la roca	r_r	Distribución triangular	2200 kg/m ³	2400 kg/m ³	2600 kg/m ³
Calor específico del fluido	c_w	Distribución triangular	4.68 (kJ/kg°C)	4.86 (kJ/kg°C)	4.97 (kJ/kg°C)
Densidad del agua	r_w	Distribución triangular	827 kg/m ³	799 kg/m ³	784 kg/m ³
Factor de planta	Fp	Distribución triangular	0.93	0.95	0.96
Factor de recuperación	R	Distribución triangular	9%	10%	11%
Factor conversión de eficiencia	η_e	Constante	N/A	12%	N/A
Tiempo	t	Constante	N/A	20/25/30 years	N/A

Tabla 2. Parámetros para la simulación Monte Carlo

Interpretación de resultados

Los resultados del cálculo volumétrico utilizando la simulación de Monte Carlo se presentan como una distribución de probabilidad discreta (figuras 2, 4 y 6) y como una distribución de probabilidad acumulativa (figuras 3, 5 y 7), respectivamente. Para este estudio se simularon tres escenarios operacionales cubriendo los periodos de 20, 25 y 30 años. Cada figura se compone de 10,000 resultados al azar. A partir de estos resultados se pueden calcular parámetros estadísticos diferentes, como los valores más probables, el intervalo de confianza del 90%, los resultados promedio y la mediana, desviación estándar y dónde cae el límite del 90% de la función de probabilidad acumulativa. Estas estadísticas para los tres períodos de producción se presentan más adelante en la Tabla 2.

Escenario para 20 años

De acuerdo al modelo volumétrico se predice con un 90% de confianza que el potencial geotérmico del sitio se encuentra entre 27 y 61 MWe para un periodo de 20 años, siendo el valor más frecuente (con una probabilidad del 2,7%) entre 38-39 MWe (Figura 2).

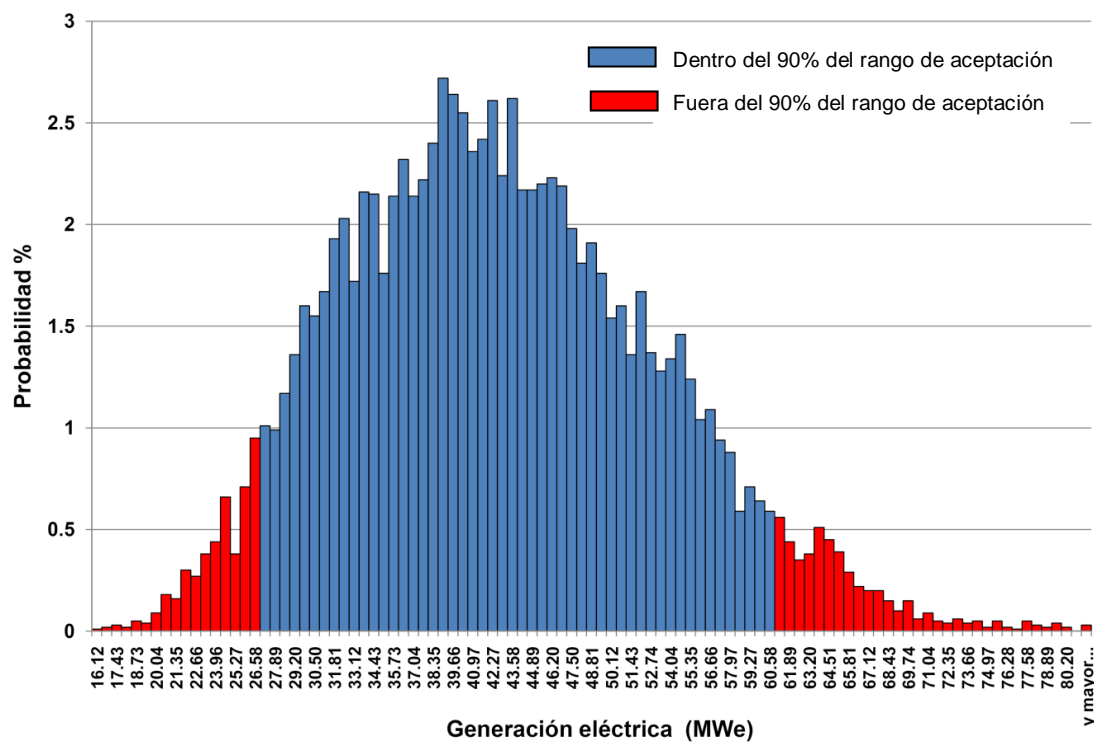


Figura 2. Distribución de probabilidad para la posible generación de energía eléctrica en MWe para un periodo de 20 años.

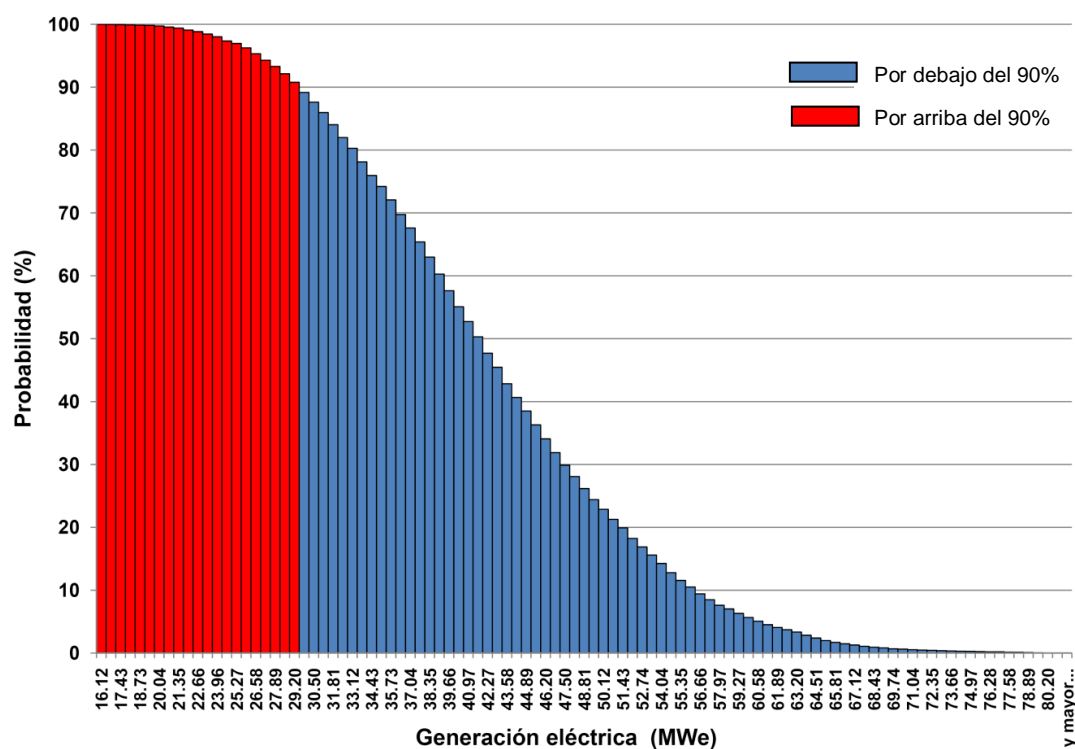


Figura 3. Distribución de probabilidad acumulativa para la posible generación de energía eléctrica en MWe para un periodo de 20 años.

De la probabilidad acumulada en la Figura 3 se puede observar que el modelo volumétrico predice con 90% de probabilidad de que al menos 29 MWe pueden ser producidos por un periodo de producción de 20 años.

Escenario para 25 años

De acuerdo al modelo volumétrico se predice con un 90% de confianza que el potencial geotérmico del sitio se encuentra entre 22 y 45 MWe para un periodo de 25 años, siendo el valor más frecuente (con una probabilidad del 2,6%) entre 29 y 30 MWe (Figura 4).

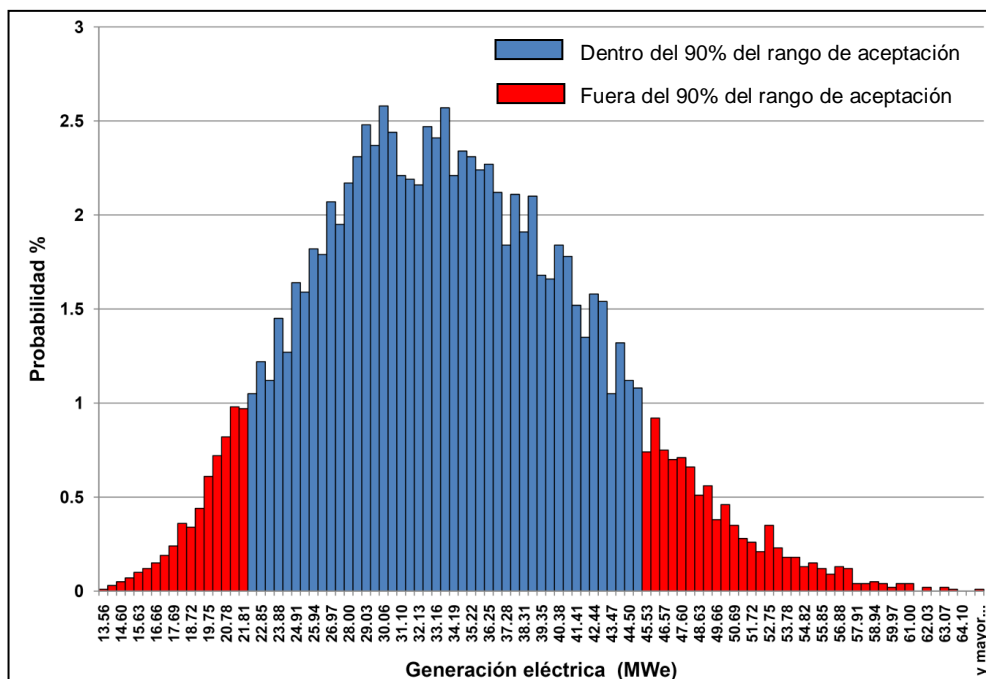


Figura 4. Distribución de probabilidad para la posible generación de energía eléctrica en MWe para un periodo de 25 años.

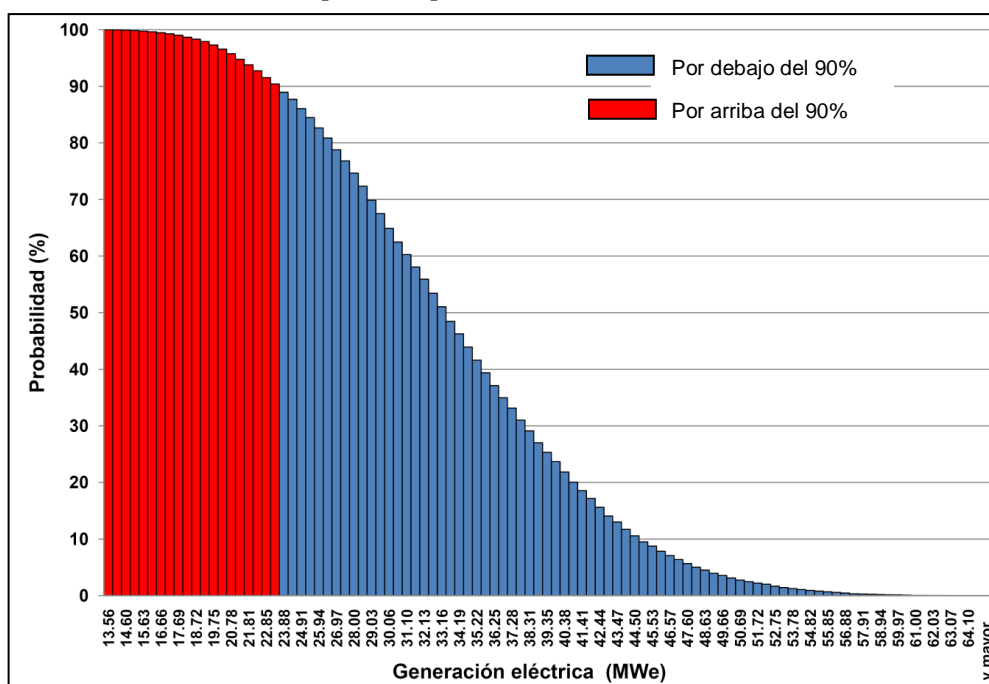


Figura 5. Distribución de probabilidad acumulativa para la posible generación de energía eléctrica en MWe para un periodo de 25 años.

De la probabilidad acumulada en la figura 5 se puede observar que el modelo volumétrico predice con 90% de probabilidad de que al menos 23 MWe pueden ser producidos por un periodo de producción de 25 años.

Escenario para 30 años

De acuerdo al modelo volumétrico se predice con un 90% de confianza que el potencial geotérmico del sitio se encuentra entre 18 y 40 MWe para un periodo de 30 años, siendo el valor más frecuente (con una probabilidad del 2,6%) entre 27 y 28 MWe (Figura 6).

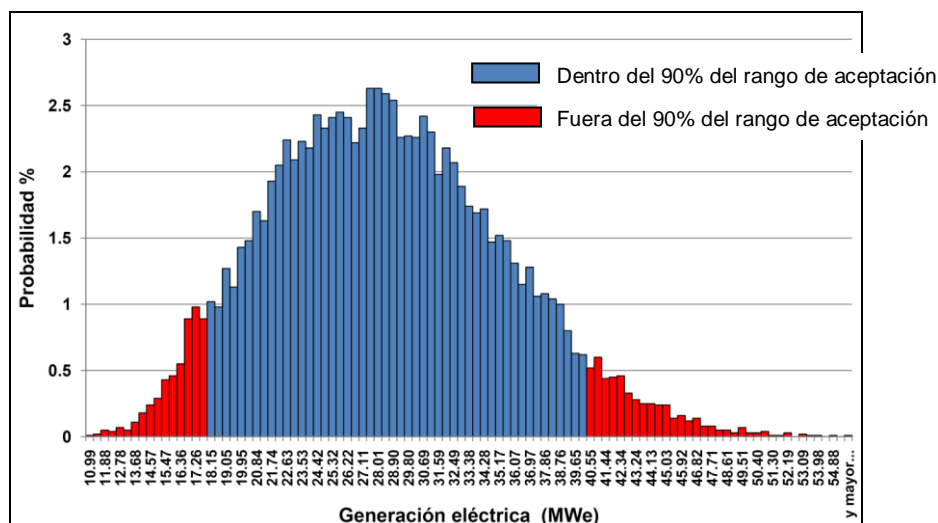


Figura 6. Distribución de probabilidad para la posible generación de energía eléctrica en MWe para un periodo de 30 años.

De la probabilidad acumulada en la figura 7 se puede observar que el modelo volumétrico predice con 90% de probabilidad de que al menos 19 MWe puede ser producido por un período de producción de 30 años.

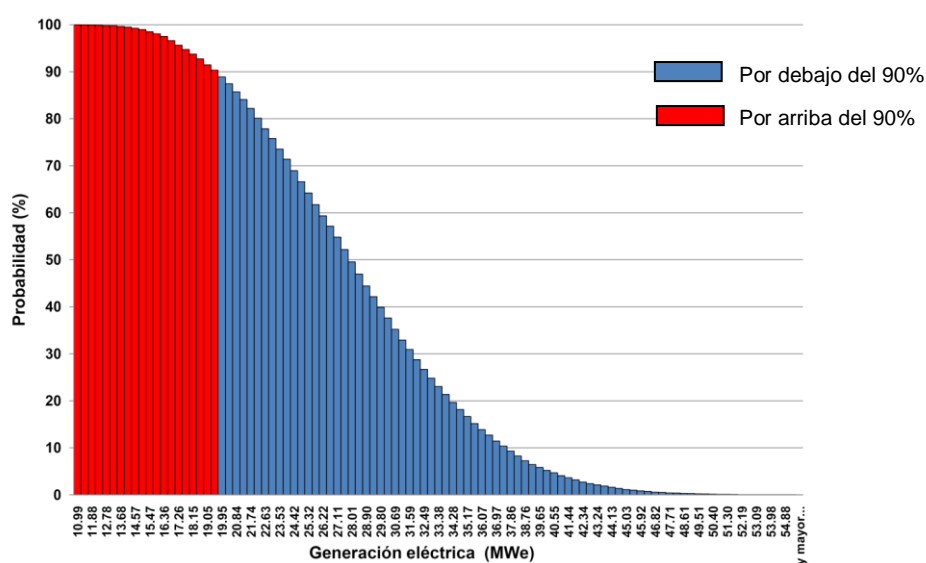


Figura 7. Distribución de probabilidad acumulativa para la posible generación de energía eléctrica en MWe para un periodo de 30 años.

Valores estadísticos	Valores [MWe] (para 20 años)	Valores [MWe] (para 25 años)	Valores [MWe] para 30 años
<i>2.7% de probabilidad</i>	38-39		
<i>2.6% de probabilidad</i>		29-30	27-28
<i>90% intervalo de confianza</i>	27-61	22-45	18-40
<i>Media</i>	42.43	33.88	28.31
<i>Mediana</i>	41.7	33.35	27.92
<i>Desviación estandar</i>	10.35	8.22	6.88
<i>90% Limite</i>	29	23	19

Tabla 2. Parámetros estadísticos de la distribución de probabilidad.

Conclusiones

De acuerdo al modelo volumétrico se predice con un 90% de confianza que el potencial geotérmico del sitio se encuentra entre 27 y 61 MWe para un periodo de 20 años, entre 22 y 45 MWe para un periodo de 25 años y entre 18 y 40 MWe para un periodo de 30 años.

La evaluación volumétrica del potencial geotérmico utilizando el método Monte Carlo muestra que existe el 90% de probabilidad que el potencial eléctrico pueda ser al menos de 29 MWe para un periodo de 20 años, de 23 MWe para un periodo de 25 años y de 19 MWe para un periodo de 30 años.

Referencias

- Arellano, U., Jiménez, E., Rocha, V.S. y Palma, S.H. (2010): “Estudio de la evaluación geológica-estructural en el complejo volcánico de El Chichonal, Estado de Chiapas”. Subgerencia de Estudios, Depto. de Exploración. DGL-VC-03-10.
- Macías, J.L. (2010): “Estudio de prospección geotérmica para evaluar el potencial del volcán Chichonal, Chiapas. Contrato 9400047770”. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Malcom A. Grant, Ian G. Donalson, Paul F. Bixley (1982): “Geothermal Reservoir Engineering”. Academic Press Inc.
- Molina, A.M. (2009): “Assessment of the northern part of Los Azufres geothermal field, Mexico, by Lumped parameter modeling and Monte Carlo simulation”. Report 18 in: Geothermal training in Iceland, 2009. UNU– GTP, Iceland, 345-364.
- Sandoval, F., Velázquez, N., Palma, S.H. y Flores, M.C. (2010): “Geoquímica de manantiales de la zona geotérmica del volcán El Chichonal, Chiapas”. Subgerencia de Estudios, Depto. de Exploración. DGQ-GQ-CHI-01-10.