

# Selección del orificio de integración para mejorar la vida útil del pozo LV-6 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S.

Miguel Ramírez Montes<sup>1</sup>, Lilibeth Morales Alcalá<sup>1</sup>, Magaly Flores Armenta<sup>1</sup>,  
Fernando Sandoval Medina<sup>1</sup> y Pedro Hernández Lagunas<sup>2</sup>

1) Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, 2) Residencia de Las Tres Vírgenes.  
Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos.

e-mail: [miguel.ramirez02@cfe.gob.mx](mailto:miguel.ramirez02@cfe.gob.mx)

---

## Resumen

El pozo LV-6 se perforó en 2009 a una profundidad total de 2505 metros, en el campo de Las Tres Vírgenes, BCS, donde los fluidos geotérmicos del yacimiento tienden a presentar una sobresaturación de calcita. Esto suele provocar precipitación e incrustación de este mineral en la zona donde ocurre el cambio de fase (*flasheo*). Por esta razón, la selección del diámetro del orificio de producción con el que se integrará el pozo al sistema de suministro de vapor es un factor clave para obtener la máxima rentabilidad en cada caso. Así, los fluidos producidos por el pozo LV-6 fueron analizados para determinar los índices de saturación de calcita, cuarzo y sílice amorfa a partir de la composición química del agua y gases bajo diferentes diámetros de orificio. Se observó que a menores diámetros de orificio los índices de saturación tienden a la línea de equilibrio (valor cero), sobre todo a temperaturas superiores a 230°C. Del análisis de la curva característica de producción del pozo, se determinó que los diámetros de orificio idóneos son los de 3.5" y 4", pues con ellos la presión de cabezal registrada en el pozo es muy superior a la presión de integración, mientras que con el orificio de 6" de diámetro la presión de cabezal está cerca de la presión de integración, lo cual representa un riesgo de desestabilización si se presentara una variación pequeña en la presión de separación. Adicionalmente, se observó que la producción de vapor mediante el orificio de 4" resulta ser un 18% superior a la que se obtiene con el orificio de 3.5" de diámetro. Por lo tanto, la conclusión es que el diámetro idóneo del orificio para integrar el pozo al sistema de suministro de vapor del campo es el de 4". Una vez determinado este orificio idóneo, que minimizará la incrustación de calcita y maximizará la producción, se analizaron los mecanismos de producción. Para esto último se calibraron los perfiles de presión y temperatura medidos y se determinaron las zonas de aporte de fluidos, las entalpías y los porcentajes de aporte de cada una, mediante el software de simulación de pozos Wellsim®.

*Palabras clave:* Producción de vapor, incrustación, calcita, geoquímica, diámetros de orificio de producción, Las Tres Vírgenes.

## Abstract

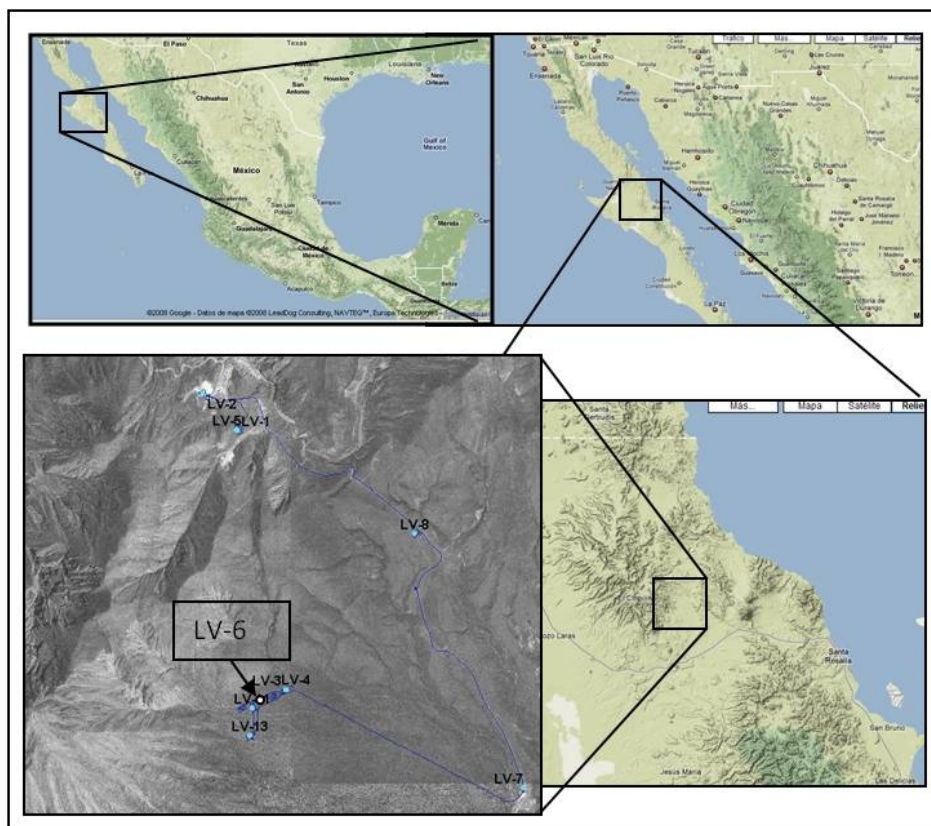
The well LV-6 was drilled in 2009 with total depth of 2505m in Las Tres Virgenes geothermal field, BCS, where the reservoir geothermic fluids present calcite saturation. This generates precipitation and incrustation in the phase change zone (flashing zone). For this reason, the selection of the production orifice plate is the key to obtain maximum rentability in each case. In this case, it was performed an analysis of the fluid of the LV-6 well, to determine the calcite, quartz and amorphous silica saturation indexes using different production orifice plate sizes. It was observed that with smaller orifice plate sizes the saturation index tend to the balance line (value 0), especially with temperatures above 230°C. Using the production output curve and the chemical indexes, it was determined optimal orifice plate sizes for the well, between 3.5 and 4in. Using this sizes the head pressure is higher to the integration pressure. Using 6in size, the wellhead pressure is close to the integration pressure, and this represents an unstable condition if a small variation in the separation pressure occurs. Additionally, it was observed that the steam production is 18% higher using the 4in size than the production registered using the 3.5in size. Therefore, the best orifice plate size for the integration of the well to the steam gathering system is 4in. Once the optimal orifice plate was determined, minimizing the calcite saturation index with

the maximum allowable steam production, the next task was to analyze the production mechanics. To do that, pressure and temperature log profiles and feed zones characteristics were determined using Wellsim® as a well simulator.

*Key words: Steam production, incrustation, calcite, geochemistry, production hole size, Las Tres Vírgenes.*

### Antecedentes

El Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, se localiza en la porción norte de la península de Baja California Sur, a 32 km al noroeste de la población de Santa Rosalía (figura 1). Fisiográficamente se sitúa al sur de la Sierra El Aguajito y en la porción norte del conjunto volcánico de Tres Vírgenes. Este campo está situado sobre un complejo hidrotermal volcánico a una elevación de alrededor de los 720 msnm. La perforación del pozo LV-6, inició el día 25 de junio de 2009 y terminó el 24 de diciembre del mismo año, alcanzando una profundidad de 2505 m. El pozo es direccional desde la profundidad de 895,81 m, con un rumbo de N85° W y un desplazamiento horizontal de 485,34m, se perforó con barrenas de 26", 17 ½", 12 ¼" y con 8 ½" de diámetro la última etapa. El pozo se terminó con agujero descubierto a partir de los 1247 m de profundidad hasta los 2505 m. La profundidad vertical del pozo es de 2418, 49 m.



**Figura 1.-** Localización del campo geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S.

Posterior a la perforación del pozo, se efectuó la estimulación matricial ácida del mismo, con la finalidad de eliminar los residuos de lodo bentonítico que fueron depositados en las fracturas y poros de la roca que almacena el fluido geotérmico. El volumen acumulado de lodo perdido en el agujero de 0,216 m (8 ½") fue de 1630 m<sup>3</sup>. La inyección de las diversas mezclas de ácidos se realizó el 29 de diciembre de 2009.

La inducción del pozo se efectuó mediante el método de aligeramiento de columna, mediante inyección constante de aire con tubería de perforación por debajo del nivel de espejo de agua. El pozo comenzó a fluir por sí mismo el día 04 de enero del 2010, con un gasto de agua de 20 t/h y una presión de cabezal de 1,7 bara. La Tabla 1 muestra los gastos máximos medidos en el pozo LV-6, fluyendo al silenciador con orificios de 3,5", 4", 4,5" y 6" de diámetro, calculados a condiciones atmosféricas de separación.

Placa de Orificio	Presión Cabezal (bara)	Gasto Máximos (t/h) @Psep=0.93 bara		
		Qv	Qa	Qm
3.5"	14	23	42	65
4"	12	35	66	101
4.5"	11	40	74	114
6"	8	53	89	142

**Tabla 1.-** Gastos máximos de producción con diferentes placas de orificio

Con los datos medidos con cada orificio de producción se obtuvo la curva característica de producción correspondiente al pozo LV-6. En la **figura 2** se muestran las curvas características de producción calculadas tanto a presión atmosférica como a condiciones de separación de 4.5 bara. Se observa que la producción de vapor máxima del pozo a condiciones de separación es de unas 45 t/h de vapor con una presión de cabezal de 5.5 bara. Sin embargo, el fluido producido por este campo geotérmico, presenta sobresaturación por minerales como la calcita, por lo cual no es conveniente explotar los pozos a su máxima capacidad, además de hacer necesaria la inyección ininterrumpida de inhibidores químicos que eviten la depositación del mineral mencionado. En el caso del pozo LV-6, esta cámara se instaló en mayo de 2010.

Es por lo anterior que a continuación se analizan los aspectos químicos y termodinámicos que permitan seleccionar el diámetro de explotación que maximice la vida útil del pozo con el mayor flujo de vapor del mismo.

### Características geoquímicas (índices de saturación)

Con la finalidad de determinar geoquímicamente el orificio idóneo de integración del pozo LV-6, se determinaron por medio del programa de especiación química, *SPCALC*, los índices de saturación de Calcita, Cuarzo y Sílice amorfa, en cada uno de los diámetros de orificio por los cuales fue evaluado el pozo. La composición química del agua y de los gases usados para los cálculos se muestra en las tablas 2 y 3. Las diferentes curvas de los índices de saturación con respecto a la temperatura, se muestran en las figuras 3, 4, 5 y 6 en donde los valores de índices de saturación positivos, corresponden a situaciones con sobre saturación de minerales, incrementando la velocidad de incrustación, mientras que los valores en cero denotan equilibrio químico y los valores negativos significan estado de insaturación, con pocas expectativas de depositación de minerales.

Cada una de las figuras corresponde a un diámetro distinto de producción, en este caso, la figura que presenta índices de saturación de calcita, tendiendo a la línea de equilibrio (valor cero), sobre todo para temperaturas superiores a 230°C, es la que corresponde al orificio de 3.5" de diámetro.

Con lo anterior mencionado se puede concluir que con respecto al fenómeno de depositación de calcita que podrían presentarse en el pozo, es recomendable que sea integrado por orificio no mayor a 4" de diámetro.

FECHA	POZO	o de orificio de producción	Cg Tot % w	Composición química en % peso base seca								
				CO2	H2S	NH3	H2	He	Ar	O2	N2	CH4
21/01/10	LV-6	Valvula 10" Reg. 7 H.A.	0.83	80.8101	3.3315	0.9354	0.1460	0.0933	0.4298	0.0000	14.2126	0.0414
09/02/10	LV-6	3 "	0.38	82.3348	6.1796	1.3397	0.1250	0.0592	0.2969	0.0000	9.6371	0.0277
22/02/10	LV-6	3 1/2 "	0.36	82.9599	6.3155	1.0251	0.1142	0.0436	0.2556	0.0000	9.2518	0.0343
08/03/10	LV-6	3 1/2 "	0.32	82.2387	7.5224	1.0691	0.1005	0.0492	0.2619	0.0000	8.7289	0.0292
16/03/10	LV-6	6"	0.29	84.1886	7.0155	0.7638	0.0950	0.0595	0.2317	0.0000	7.6227	0.0232

**Tabla 2.-** Composición de los gases del vapor producido por el pozo Lv-6



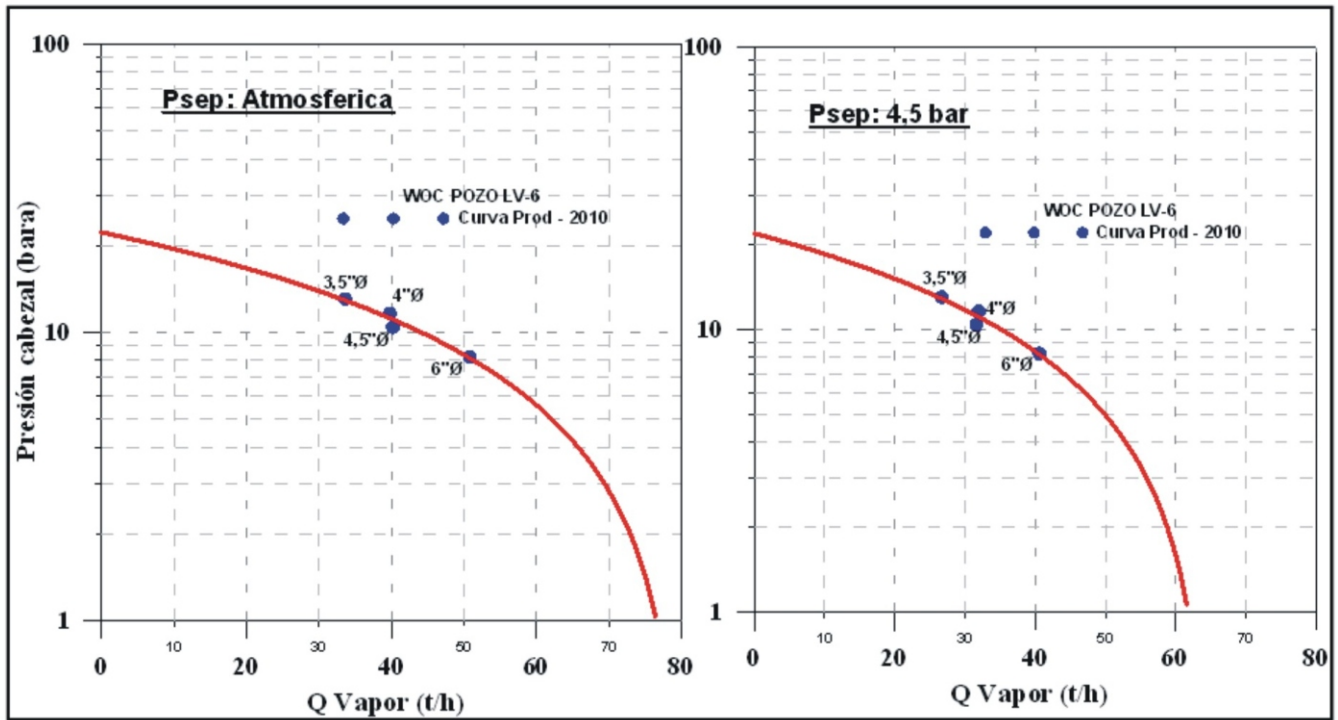


Figura 2.- Curva Característica del pozo LV-6

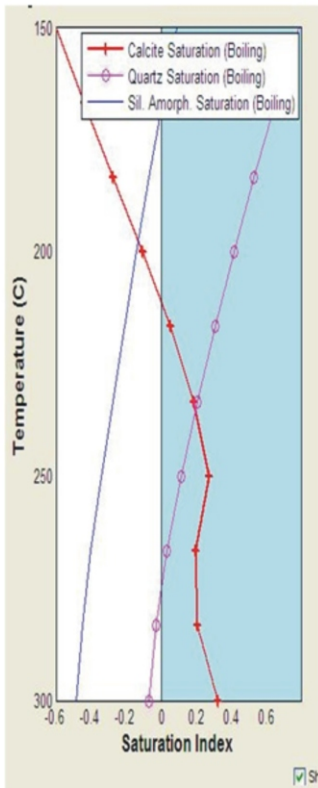


Figura 3.- Orificio de 3"

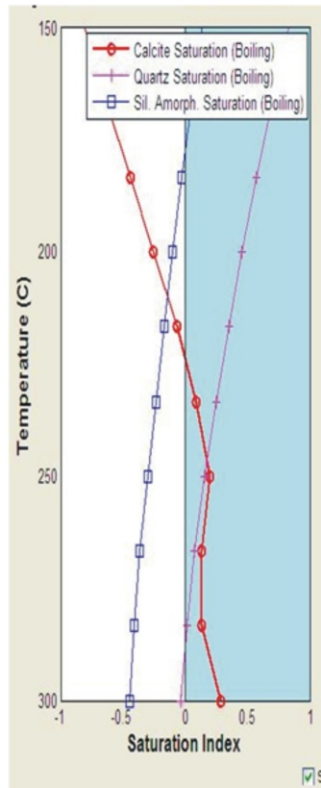


Figura 4.- Orificio de 3.5"

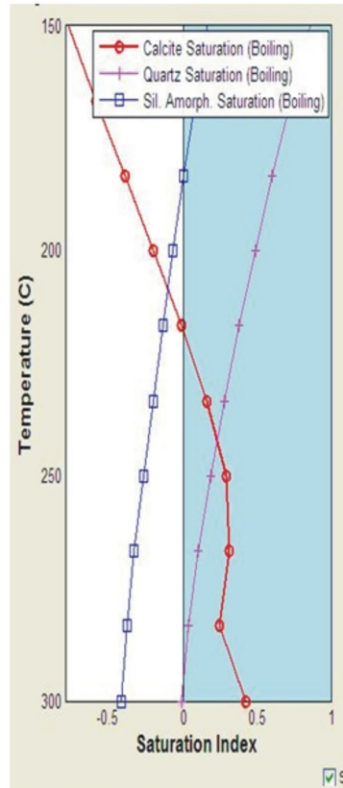


Figura 5.- Orificio de 4.5"

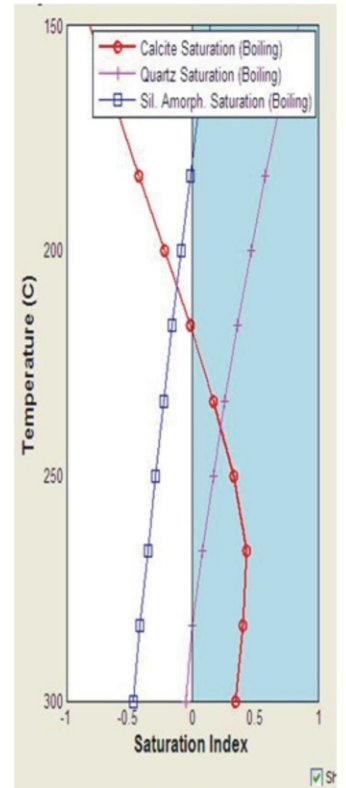


Figura 6.- Orificio de 6"

POZO	LV-6	LV-6	LV-6	LV-6	LV-6
FECHA	21-ene-10	9-feb-10	22-feb-10	8-mar-10	16-mar-10
PUNTO DE MUESTREO	Vertedor	Sep. Port	Sep. Port	Vertedor	Vertedor
CONDICIONES DE OPERACIÓN	Valvula de 10" 7 H.A.	Orif. 3"	Orif 3 1/2"	Orif 3 1/2"	Descarga de 6"
P. CAB. (lb/in <sup>2</sup> )	77	72	107	128	105
P. SEP. (lb/in <sup>2</sup> )	72	69	103	120	100
TEMP.	96	97	97	97	97
pH	6.84	7.09	7.09	7.21	7.2
C.E.	23500	22200	24900	22000	23500
ALC. TOT.	0.64	0.68	0.6	0.72	0.72
Cl	8828	8509	8934	8934	9147
HCO <sub>3</sub>	4.9	4.9	1.2	0.0	1.2
SO <sub>4</sub>	51	51	40	44	38
B	195	190	182	184	182
SiO <sub>2</sub>	749	761	809	856	832
Na	4563	4514	4686	4637	4763
K	796	740	764	769	808
Li	26.1	25.7	27	25.7	27
Ca	486	380	372	392	396
Mg	5.1	0.37	0.08	0.27	0.24
Fe	0.85	0.36	0.24	0.13	0.22
Temp. °C Na /K	270	263	263	265	267

**Tabla 3.-** Composición química del agua separada del pozo Lv-6

### Características termodinámicas

Durante la etapa de evaluación de la producción del citado pozo LV-6, se tomaron registros de presión y temperatura con cada uno de los diámetros de placa de orificio, **figura 7**, con la finalidad de identificar zonas permeables y el punto de ebullición de los fluidos dentro del pozo. En la **figura 8** se muestran estos registros para cada uno de los orificios de medición.

En los registros de presión anteriores se calcularon las temperaturas de saturación correspondientes, para identificar la profundidad en la cual ocurre el cambio de fase (ebullición), los resultados se muestran en la tabla 4. Como es de esperarse a mayor flujo, el cambio de fase se lleva a cabo a mayor profundidad, por lo que las zonas de producción que se encuentran por encima de este cambio de fase son susceptibles de incrustación, al no encontrarse protegidas con los inhibidores químicos, que deben inyectarse en fase líquida.

Placa de Orificio	Profundidad de cambio de fase (m)
3,5"	1400
4"	1600
4,5"	1900
6"	2000

**Tabla 4.-** Punto de ebullición del fluido con diferentes orificios.

### Simulación con Wellsim

Como se mencionó en el capítulo anterior, para flujos de producción mayores, el cambio de fase se lleva a cabo a mayor profundidad, quedándose susceptibles a incrustarse por calcita aquellas zonas que cambien de fase en la formación rocosa. Es deseable seleccionar un orificio de producción que por un lado, permita la mayor explotación del vapor del pozo y por el otro, que maximice el tiempo de vida útil del mismo, disminuyendo el ritmo de incrustación por calcita. Con la finalidad de encontrar este balance óptimo, se efectuaron simulaciones de la producción del pozo mediante el simulador comercial Wellsim.

Como primer paso, se determinaron las zonas de producción del pozo y su aportación específica, tomando como base las zonas permeables determinadas mediante la serie de

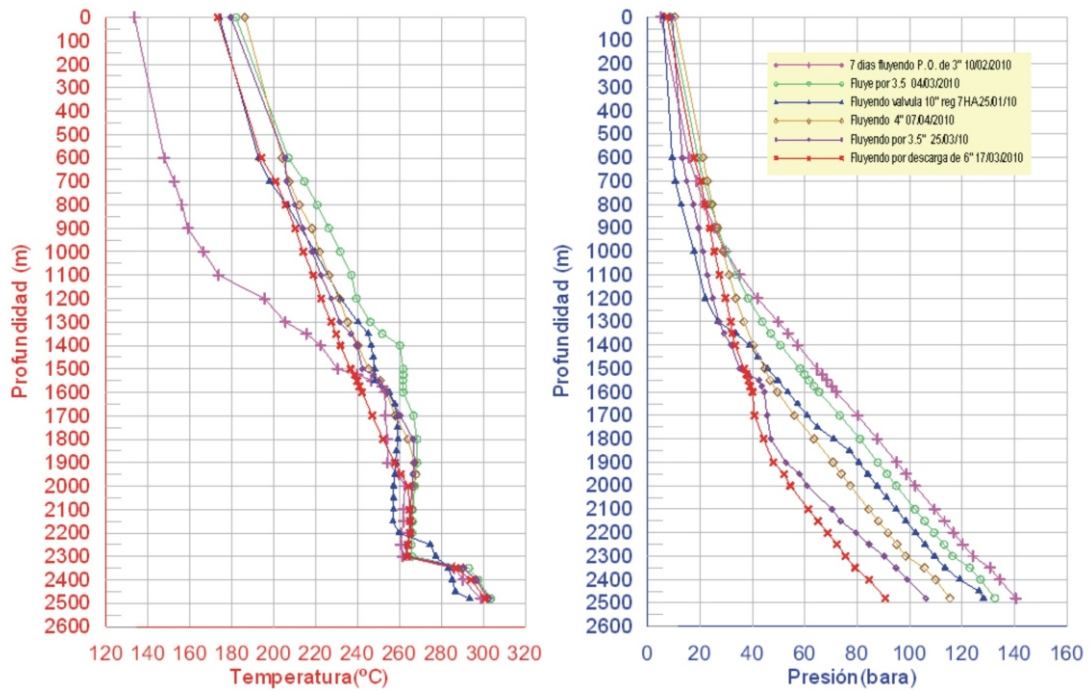


Figura 7.- Registros Presión-Temperatura del pozo LV-6

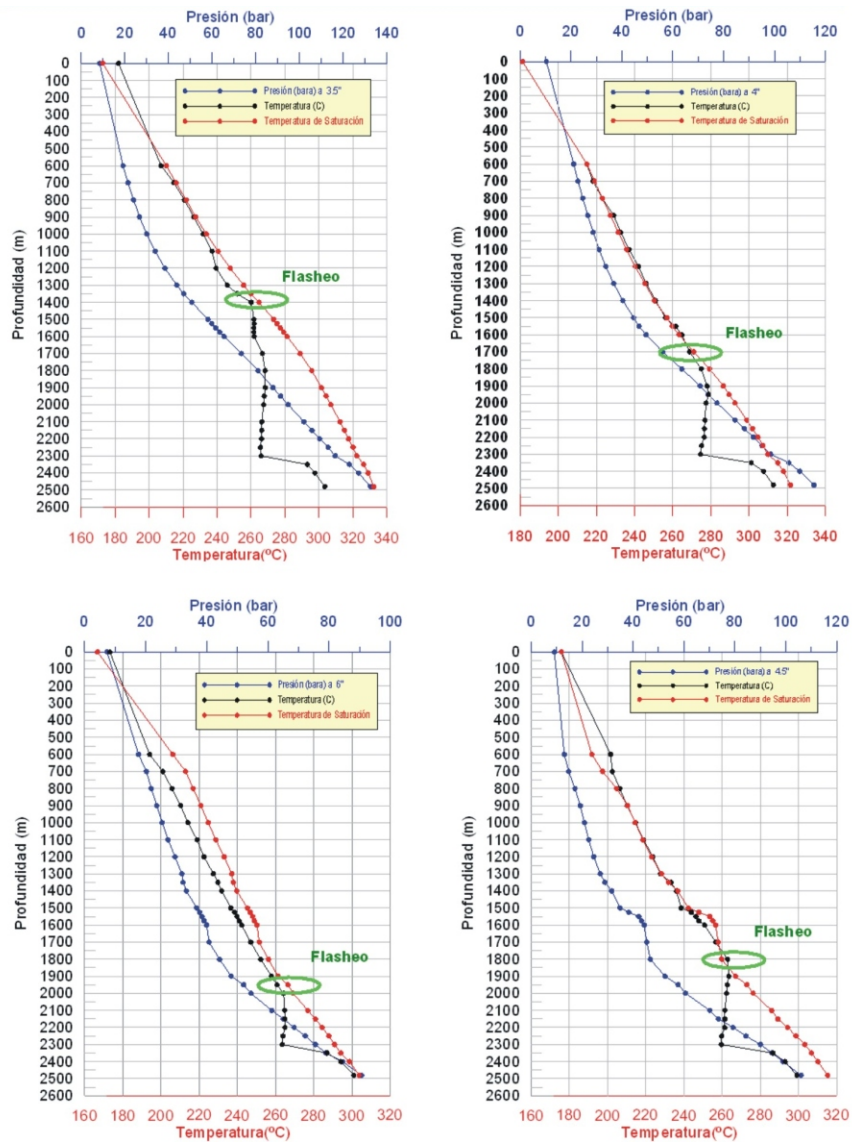


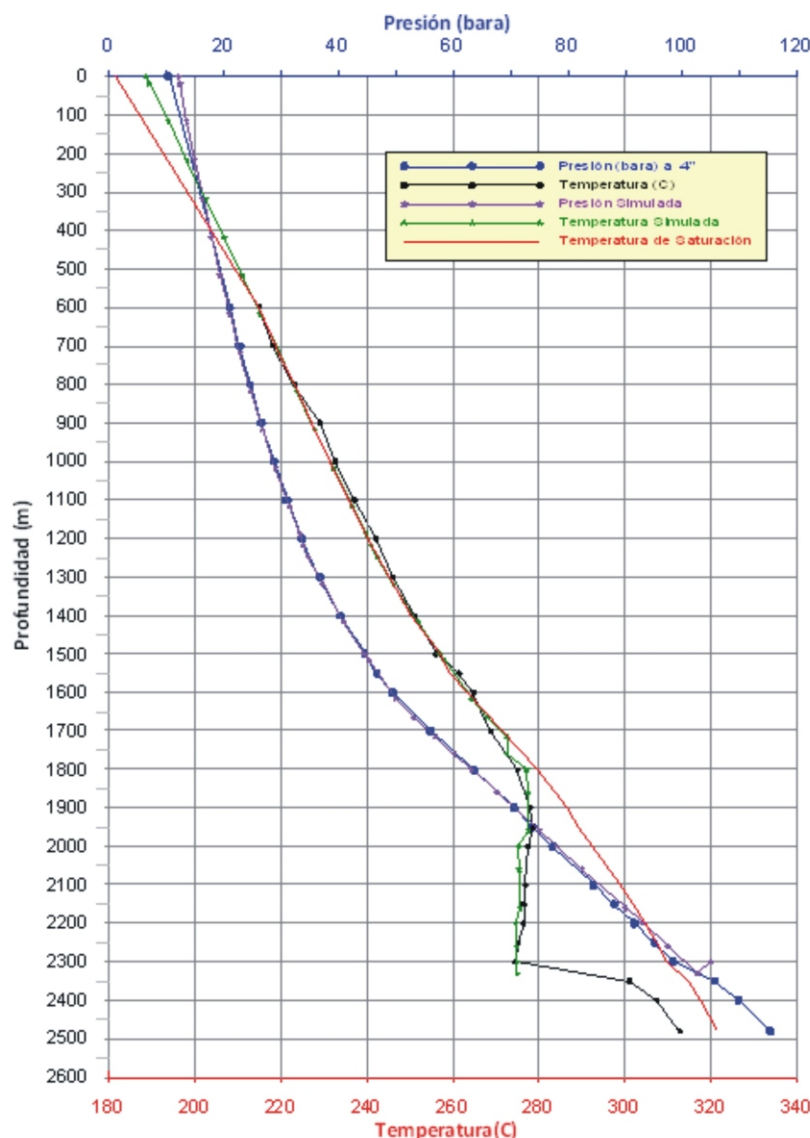
Figura 8.- Temperatura de saturación y cambio de fase del pozo LV-6

registros de presión y temperatura al término de la perforación del pozo, prueba de pérdida de agua, geología y petrología, y las zonas estimuladas durante la acidificación del pozo. La calibración se realizó tomando como base la información de los registros de presión-temperatura del 7 de abril de 2010, cuando el pozo se encontraba con un gasto total 98 t/h calculado fluyendo por un orificio de 4", **figura 9**.

Para la calibración del registro fue necesaria la simulación de 7 zonas de aporte. La tabla 5 muestra la ubicación y condiciones termodinámicas de las zonas de aporte incluidas para la calibración del registro (figura 8). De esta simulación se desprende que las zonas de mayor relevancia se localizan a 1700, 2000 y 2300 m de profundidad. La profundidad en que ocurre el cambio de fase es aproximadamente en el intervalo de 1605m y 1660 m, con una temperatura de 270 °C, entalpia de 1174 a 1198 kJ/kg y una presión de 53-57 bara respectivamente, congruente con los datos medidos.

Profundidad [m]	Entalpia [kJ/kg]	Gasto de Mezcla [t/hr]	% Gasto de Mezcla	Presión [bara]
1250	2500	7	7.1	44.92
1500	1070	13	13.3	65.8
1700	1100	18	18.4	82.68
1800	1080	10	10.2	90.89
2000	1250	22	22.4	107.8
2200	1230	7	7.1	124.92
2300	1211	21	21.4	105

**Tabla 5.- Zonas de aporte y sus porcentajes**



**Figura 9.- Calibración de simulación con registro medido del pozo LV-6**



De lo anterior se desprende que con el orificio de 4" de producción, se tendría riesgo de incrustar las zonas superiores de producción, protegiéndose el equivalente al 79.6% de la producción total del pozo. Las zonas superiores en riesgo de incrustación en el mediano plazo equivalen a 6 t/h de vapor. Con orificios menores la producción de vapor no es suficiente para recuperar la inversión y con orificios mayores, el riesgo de perder producción por incrustación de las zonas productoras someras e intermedias se intensifica.

### Conclusiones

- Al término de su inducción el pozo Lv-6 comenzó a fluir con un gasto de agua de 20 t/h y una presión de cabezal de 1,7 bara, alcanzando su producción máxima de 142 (t/h) de mezcla, de los cuales el 37% corresponde a vapor (53 t/h) y el restante 63% (89 t/h) a agua, esto con un diámetro de orificio de 6".
- Con la composición química del agua y los gases a los diferentes diámetros de orificio en los cuales se evaluó el pozo se determinaron los índices de saturación de Calcita, Cuarzo y Sílice amorfa, obteniéndose que por orificio de 3,5" de diámetro estos índices de saturación tienden a la línea de equilibrio (valor cero), sobre todo de temperaturas superiores a 230°C.
- De la curva característica de producción se obtiene que a presión de separación con un orificio de 3.5" alcanza 14 bara de presión, con un gasto de vapor de 27 t/h, sin embargo con orificio de 6" la presión de cabezal disminuye en un 40% en comparación con orificio de 3.5" y con respecto al gasto de vapor se incrementa por encima de 40 t/h. Con lo cual determina que los diámetros de orificio idóneos son los de 3,5" y 4", debido que la presión de cabezal está muy por encima de la presión de integración aunado también a que con orificio de 4", se obtiene el 18% más de producción que con el orificio de 3,5".
- De acuerdo con la simulación realizada las zonas de producción más importantes del pozo se localizan: la más somera a los 1250m, enseguida a los 1500 m, 1700 m, 1800 m, 2000m, 2200 m y 2300 m, siendo la zona de 2000m de profundidad la de mayor aporte con un 22.4% del flujo total. Se determina también que teniendo el pozo integrado por el orificio de 4", se tendrían protegidas el 79.6 % de las zonas productoras, con riesgo de que se incrustaran en el mediano plazo las dos zonas someras de 1250 y 1500 m de profundidad, debido a que el punto de ebullición se localiza a los 1600 m de profundidad y por encima de este el inhibidor no puede proteger dichas zonas someras.
- Las zonas superiores en riesgo de incrustación en el mediano plazo equivalen a 6 t/h de vapor. Con orificios menores la producción de vapor no es suficiente para recuperar la inversión y con orificios mayores, el riesgo de perder producción por incrustación de las zonas productoras someras e intermedias se intensifica.
- Bajo esta condición de flujo (orificio de 4"), el pozo estaría produciendo 27 t/h de vapor las cuales se integrarían con las producciones de los otros pozos para entregar a la central alrededor de 83 t/h de vapor, es decir 8.7 MW (Tabla 6).

Pozo	Placa de Orificio	WHP	Gasto (t/h)			Generación (Mwe)	Fecha
			Qv *	Ql *	Qm		
LV-4A	3 1/4"	9.11	12.51	45.07	57.58	1.3	31/03/10
LV-11	5 1/2"	10	35.5	131.61	167.11	3.7	31/03/10
LV-13D	2 7/8"	8.57	7.44	27.56	35	0.9	31/03/10
LV-6	34"	14	27	77.14	104.14	3.2	07/05/2010

**Tabla 6.-** Producciones actuales de los pozos y su generación



- El pozo LV-6 se integró al sistema de generación comercial el día 15 de mayo de 2010, fluyendo por orificio de 0,1016 m (4") con una producción de vapor de 24 t/h.

### Referencias

1. CFE, Base de Datos GDManager del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S.
2. Compendio de Croquis de Estado Mecánico de los pozos, fuente; copia de originales de perforación.
3. Morales L., "Balance de Masa del Yacimiento de Las Tres Vírgenes para el año 2009", Reporte Interno DINYAC-013-2010, Enero 2010.
4. Hernández P., Sánchez M., Gómez J., Tapia R., "Informe Final de resultados de la perforación y estimulación ácida del pozo LV-6". Reporte interno RTV-RE-03-2010, Julio 2010, 76p.
5. Grant M., Donaldson I., Bixley P. "Geothermal Reservoir Engineering". Draft edition, 1982.
6. Perry R., (1994) Chemical Engineer's Handbook. International Edition 3rd printing. 1987
7. Ramírez M., Hernández C., Rojas M. "Análisis para localización y perforación del pozo Lv-6", DINYAC-009-2004.
8. Registro de penetración metro a metro del pozo LV-6, Residencia de Obras Geotérmicas de Las Tres Vírgenes 2009.
9. Reportes diarios de perforación, Residencia de Obras Geotérmicas de Las Tres Vírgenes, 2009.
10. Informe técnico de las operaciones desarrolladas en la construcción del pozo LV-6 durante el periodo comprendido del 25 de junio de 2009 al 05 de enero del 2010. Pozos y perforaciones de México, S.A. de C.V.