

## **ANAGEOT: Sistema auxiliar en el análisis de datos químicos, isotópicos y de producción**

**Adriana Paredes, Víctor Manuel Arellano, Rosa María Barragán, Alfonso Aragón y Siomara López**

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor. Correo: [aparedes@iie.org.mx](mailto:aparedes@iie.org.mx)

### **Resumen**

El presente trabajo describe una herramienta computacional desarrollada para auxiliar el análisis de datos químicos, isotópicos y de producción de pozos geotérmicos. ANAGEOT es un software interactivo y amigable que permite efectuar de manera rápida y eficiente la modificación, recuperación y representación gráfica de las extensas cantidades de información involucradas en el estudio de los yacimientos geotérmicos. Su aplicación optimiza tiempo y recursos, debido a que los datos históricos de la mayor parte de los pozos de los distintos campos geotérmicos comprenden grandes cantidades de información, en ocasiones por largos periodos de tiempo. El sistema tiene la flexibilidad de trabajar con distintos campos geotérmicos, considerando una base de datos por cada campo. Una característica muy importante de esta herramienta es que los reportes, tablas y gráficos son generados de tal manera que pueden ser editables en todo momento. Igualmente se pueden utilizar como archivos fuente para otras aplicaciones, ya que se generan en aplicaciones comerciales de uso generalizado como Microsoft Word, Excel y Golden Grapher.

*Palabras clave:* Base de datos, Campo Geotérmico, Instalaciones superficiales, Herramienta computacional, Software interactivo, Procesamiento de información, Pozos geotérmicos.

## **ANAGEOT: Auxiliary system for analysis of chemical, isotopic and production data**

### **Abstract**

This paper describes a computational tool developed to aid the analysis of chemical, isotopic and production data of geothermal wells. ANAGEOT is interactive and user-friendly software that in a quick and efficient way allows change, retrieve and display the wide amounts of data involved in the study of geothermal reservoirs. ANAGEOT optimizes time and resources, since usually historical data of most wells of the geothermal fields involve high volumes of information, occasionally for very long time periods. The system has the flexibility to work with different geothermal fields, considering a database for each field. A very important feature of this tool is that reports, charts and graphs are generated in a way that can be edited at any time. Similarly they can be used as source files for other applications, because they are generated in widespread commercial use applications such as Microsoft Word, Excel and Golden Grapher.

*Keywords:* Database, geothermal field, superficial facilities, compute tool, interactive software, information processing, geothermal wells.

### **Antecedentes**

Una parte de los trabajos que se realizan en la industria geotérmica es el estudio de la respuesta del yacimiento a las políticas de explotación que se siguen en los campos. El análisis de datos químicos,

isotópicos, termodinámicos y de producción de los pozos es una herramienta muy valiosa para estudiar el comportamiento de los campos geotérmicos en explotación. Este análisis implica el manejo e interpretación de enormes cantidades de información en ocasiones por tiempos muy largos (20 años o más). Estos estudios se realizan con cierta periodicidad, debido a la constante actualización de la información histórica de los pozos.

## **Introducción**

El análisis de datos químicos y de producción de pozos es una tarea de gran importancia durante la explotación de yacimientos geotérmicos ya que permite identificar los principales procesos de yacimiento inducidos por la extracción y eventual reinyección de fluidos (Truesdell, 1992; Arnórsson, 2000; Arellano et al., 2003; 2005; 2011; 2012; Barragán et al., 2005, 2009). Mediante el estudio de patrones de comportamiento de diversos parámetros geoquímicos (estimaciones de temperatura, fracción de vapor de yacimiento, saturación volumétrica de líquido, etc.) y de producción (gastos, presión y entalpía y condiciones a fondo de pozo) a través del tiempo y su comparación con patrones característicos, es posible anticipar problemáticas que podrían afectar las operaciones del campo y repercutir en pérdidas económicas y/o en afectaciones al recurso energético o al ambiente (Truesdell, 1995; Arellano et al., 2005, 2012; Barragán et al., 2005; 2009).

Con el objetivo de facilitar el procesamiento de la información mencionada, se desarrolló la herramienta computacional ANAGEOT (Análisis Geotérmico), la cual permite realizar en forma automatizada parte del procesamiento que implica la aplicación de modelos de equilibrio y otros métodos de manera amigable y sencilla, permitiendo optimizar tiempo y recursos en su realización, además de que permite representar la información en gráficas y tablas que de manera transparente se integran a los diferentes informes finales. En este trabajo se describe esta herramienta y se presentan algunas de las aplicaciones más representativas.

ANAGEOT ya ha sido aplicada en diferentes campos geotérmicos mexicanos (Arellano et al., 2012; 2013a; 2013b), por lo que dada la naturaleza de los proyectos y el crecimiento que algunos campos han tenido en los últimos años, resulta ser una herramienta muy útil en el procesamiento de la información para su consulta, modificación, análisis e interpretación.

## **Descripción de ANAGEOT**

ANAGEOT es una herramienta basada en arquitectura cliente-servidor, desarrollada en el lenguaje de programación Visual Basic 6 y utilizando My SQL Server (sistema de gestión de bases de datos de tipo relacional) como manejador de bases de datos. Como software de gráficas se emplea Golden Grapher versión 8 o superior y Microsoft Office Word y Excel para la visualización de reportes.

Las gráficas se generan en la aplicación Golden Grapher, por tratarse del paquete de uso más frecuente en la Gerencia de Geotermia del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) para los casos de estudio que aquí se describen. Los diferentes reportes se generan en documentos de texto y hojas de cálculo Microsoft Word y Excel, respectivamente, por tratarse de software de uso generalizado, además de que los últimos pueden ser considerados como documentos fuente para otras aplicaciones.

ANAGEOT es una herramienta multidisciplinaria e interactiva eficaz para la integración y apoyo en el estudio y análisis del comportamiento de los yacimientos geotérmicos, permitiendo la representación gráfica y tabular de diversos cálculos necesarios para el estudio, análisis e interpretación eficiente de la

información de diferentes campos geotérmicos, incluyendo los que se estudian en la Gerencia de Geotermia mencionada.

Esta aplicación es capaz de trabajar usando datos de diferentes campos geotérmicos, y cuenta con una sección de Gráficas y otra de Reportes. La sección de gráficas consiste de dos módulos, Análisis individual y Análisis global, los cuales se describen a continuación.

**Análisis individual.** Este módulo consiste de un asistente que permite al usuario realizar una serie de gráficas y análisis por pozo, permitiendo editar las características visuales tanto de símbolos como de líneas (ver Fig. 1). Las gráficas que pueden realizarse en este módulo están clasificadas por tipo, como se observa en la Tabla 1.

Tipo de gráfica	Análisis Individual Gráficas	Análisis Global Gráficas
Producción	Producción total	Fluido producido
	Producción de líquido	Producción total
	Producción de vapor	Producción de vapor
	Entalpías	Producción de líquido
		Producción total promedio anual
		Producción de vapor promedio anual
		Producción de líquido promedio anual
		Gasto total de inyectores
Química de la fase líquida	Cloruros	Cloruros en agua separada
	Ca/Cl	Cloruros en descarga total
	Saturación de líquido	Na, Ca, K, SiO <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> , B en agua separada
	Entalpía-Cl en descarga total	Na, Ca, K, SiO <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> en agua separada en descarga total
	Triángulo Ar-N2100-10He	pH promedio
	Cl en agua separada	Cl/B relación en peso
	pH-Cloruro (mg/kg)	
	pH-Boro (mg/kg)	
Química de la fase gaseosa	Exceso de vapor	CO <sub>2</sub> en descarga total
	Triángulo H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub> del yacimiento
	Triángulo H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S en descarga total
		N <sub>2</sub> en descarga total
		Gases total en descarga total
		Temperatura de vapor
		N <sub>2</sub> en gas base seca
		N <sub>2</sub> en el vapor
Termodinámica	Curva Presión-Entalpía	Entalpía de fondo
	Entalpía de fondo	Presión de fondo
	Presión de fondo	Curva Presión-Entalpía
		Entalpía de cabezal
		Presión de cabezal
Composición química de inyectores	Cloruros de inyectores	Cloruros en agua separada
	Gasto inyectado	

Tabla 1. Clasificación de gráficas que puede generar ANAGEOT.

Cuando ANAGEOT realiza la gráfica, abre en forma automática la aplicación Golden Grapher desde donde es posible editar o realizar cualquiera de las acciones que esta última aplicación permite.

También es posible realizar ajustes lineales y armónicos de algunas gráficas, lo que permite observar dentro de la aplicación las tendencias y velocidades de cambio en la producción de líquido de un pozo bajo análisis. Un ejemplo se muestra en la Fig. 2, lo cual permite estimar el comportamiento del pozo a lo largo del tiempo de operación.

La representación de los resultados se realiza automáticamente en Grapher con una descripción de cada ajuste lineal (ver Fig. 3) y una representación gráfica con los datos calculados del ajuste armónico como lo representa la Fig. 4.

En este módulo también es posible realizar una comparación de entalpía en la descarga total, entalpía CCG y entalpía de  $\text{SiO}_2$  para el análisis del comportamiento de los fluidos (Truesdell et al., 1995). En la presente aplicación se muestran dos análisis, uno dividiendo los datos históricos en tres periodos (tres casos) y uno del total de los datos históricos (caso general). En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de análisis de entalpías en tres casos del pozo 1A.

**Análisis global.** El análisis global es un módulo que permite realizar gráficas de un grupo de pozos con los datos de un periodo determinado. La mayoría de los campos geotérmicos mexicanos clasifican sus pozos por zonas, por lo que ANAGEOT maneja la misma clasificación para la representación gráfica global. Ver figuras 6 y 7 con gráficas de una zona de pozos de la producción total y los cloruros en agua separada respectivamente.

La sección de Reportes del ANAGEOT contiene cinco módulos: gastos, reporte de declinaciones, reporte de inyección, reporte de la química líquida y reporte de la química de vapor. A continuación se describe cada uno de ellos.

**Reporte de Gastos.** Permite realizar reportes en Word para un pozo o un grupo de pozos en un periodo de tiempo determinado. Los tipos de reporte aparecen en la Tabla 2.

Por pozo	Por grupo de pozos (Por zona)
Gasto total anual, entalpía y presión de fondo	Años efectivos de producción
	Producción total
	Producción promedio anual
	Producción total por fallas
	Producción promedio anual por fallas

*Tabla 2. Tipos de reporte de gastos que genera ANAGEOT.*

En las figuras 8 y 9 se presentan sólo algunos ejemplos de los reportes que se pueden generar en este módulo. Así, en la Fig. 8 se muestra la ventana de Reporte de Gastos con el Reporte de Años Efectivos de producción para un grupo de pozos (Zona 1), y en la Fig. 9 se muestra el reporte de años efectivos de producción que el módulo de Reporte de gastos genera en un documento de Word.

**Reporte de Declinaciones.** Esta ventana genera un reporte en MS Word con la velocidad de cambio de un pozo en un periodo de tiempo determinado aplicando los métodos de ajuste lineal y ajuste normalizado (Sanyal et al., 1989). Los tipos de reportes que esta ventana genera se ven en la Tabla 3.

Tipo de reporte	Tipo de ajuste
Cambios en la producción de líquido, vapor y mezcla	Lineal y Armónico
Cambios en la composición química de la fase líquida (agua separada)	Lineal
Cambios en la composición química de la fase líquida (descarga total)	Lineal
Cambios en la composición química de la fase gaseosa	Lineal
Cambios de la presión, entalpía y temperatura	Lineal y Armónico

*Tabla 3. Tipos de reporte de declinaciones.*

En la Fig. 11 se muestra la ventana de Reporte de declinaciones con los cambios de líquido, vapor y mezcla con ambos tipos de análisis (ajuste lineal y armónico).

**Reporte de Inyección.** Permite realizar reportes en Excel para un pozo o un grupo de pozos inyectores. Los reportes que se generan en este módulo son los que aparecen en la Tabla 4.

Por pozo	Por grupo de pozos
Promedio anual de inyección	Promedio anual de inyección
Gasto inyectado por día	

*Tabla 4. Tipos de reporte de inyección.*

En las figuras 12 y 13 se muestran la ventana de reporte de inyección con el promedio anual de inyección para un grupo de pozos y su respectivo documento generado en Excel (Zona 2).

**Reporte de la química líquida y reporte de la química de vapor.** Estos módulos permiten realizar reportes en Excel para un pozo o un grupo de pozos en un periodo de tiempo determinado, manteniendo las mismas características de diseño de la ventana que las que se presentan en la Fig. 12. Los reportes generados en Excel son como los que se muestran en la Fig. 13. La lista de reportes se puede ver en la Tabla 5.

	Reportes de la química líquida	Reportes de la química de vapor
<b>Por pozo</b>	Promedio anual de la química líquida	Promedio anual de gases frac. Mol x 1000 en base seca
	Promedio anual de la química líquida en la descarga total	Promedio anual de gases en la descarga total
		Datos de temperatura de separación
<b>Por zona (grupo de pozos)</b>	Promedio anual de la composición química de fase líquida	Promedio anual Gases Frac. Mol x 1000 en Base Seca
	Promedio anual de la composición química de la fase líquida en la descarga total	Promedio anual de la composición química de la fase gaseosa en la descarga total
		Datos de temperatura de separación

*Tabla 5. Tipos de reporte de la química de líquidos y de vapor.*

**Ayuda en línea.** Finalmente ANAGEOT cuenta una herramienta de ayuda en línea, la cual le permite al usuario acceder a ella en cualquier momento en que se encuentre dentro de la aplicación.

## Conclusiones

ANAGEOT es una herramienta desarrollada específicamente para auxiliar en el estudio de los reservorios geotérmicos, ayudando en la interpretación del comportamiento de los pozos de acuerdo a sus condiciones termodinámicas, químicas y de producción. Es importante tomar en cuenta que el éxito que se obtenga en el uso de esta aplicación está determinado en gran medida por la calidad de la información que se introduzca en la base de datos del ANAGEOT. Hasta el momento la herramienta ha sido utilizada con éxito en proyectos de la Gerencia de Geotermia del IIE, lo que ha permitido facilitar y optimizar el tiempo empleado en el procesamiento de la información. También ha abierto la posibilidad de seguir utilizándola en proyectos futuros.

## Referencias

- Arellano, V.M., Torres, M.A., Barragán, R.M., Sandoval, F., and Lozada, F., 2003. Chemical, Isotopic and Production Well Data Analysis for the Los Azufres (Mexico) Geothermal Field. *Geothermal Resources Council Transactions*, **27**, 275-279.
- Arellano, V.M., Torres, M.A., and Barragán, R.M., 2005. Thermodynamic Evolution of the Los Azufres, Mexico, Geothermal Reservoir from 1982 to 2002. *Geothermics*, **34**, 592-616.
- Arellano, V.M., Barragán, R.M., Aragón, A., Rodríguez, M.H., and Pérez, A., 2011. The Cerro Prieto IV (Mexico) geothermal reservoir: Pre-exploitation thermodynamic conditions and main processes related to exploitation (2000-2005). *Geothermics*, **40**, (3), 190-198.
- Arellano, V.M., Barragán, R.M., López, S., Paredes, A., y Aragón, A., 2012. Respuesta del Yacimiento de Los Azufres a la Explotación 2003-2011. Informe IIE/11/14283/02F del Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Comisión Federal de Electricidad, Cuernavaca, Morelos, México, 303 p. Inédito.
- Arellano, V.M., Barragán, R.M., López, S., Paredes, A., y Aragón, A., 2013a. Respuesta del Yacimiento de Los Humeros a la Explotación 2007-2012. Informe IIE/11/14531/02F del Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Comisión Federal de Electricidad, Cuernavaca, Morelos, México, 229 p. Inédito.
- Arellano, V.M., Barragán, R.M., López, S., Paredes, A., y Aragón, A. 2013b. Respuesta del yacimiento de Las Tres Vírgenes a la explotación 2007-2012. Informe final IIE/11/14530/I01/F del Instituto de Investigaciones Eléctricas para la Comisión Federal de Electricidad, 78 p. Inédito.
- Arnórsson, S., and D'Amore F., 2000. Monitoring of reservoir response to production. In: (Arnórsson, S., ed.) *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 309-351.
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Portugal, E., and Sandoval, F., 2005. Isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. *Geothermics*, **34**, 527-547.

- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Martínez, I., Aragón, A., Reyes, L., y González, R., 2009. Patrones de comportamiento de especies químicas e isotópicas (2006-2007) en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., en respuesta a la reinyección. *Geotermia*, **22** (2), 19-27.
- Fetkovich, M.J., 1980. Decline curve analysis using type curves. *Journal of Petroleum Technology*, **32** (6), 1065-1077.
- Sanyal, S.K., Menzies, A.J., Brown, P.J., Enezy, K.L., and Enezy, S, 1989. A systematic approach to decline curve analysis for The Geysers steam field, California. *Geothermal Resources Council Transactions*, **13**, 415-421.
- Truesdell, A.H., 1991. Effects of physical processes on geothermal fluids. In: (F. D'Amore, ed.) *Application of geochemistry in geothermal reservoir development*. UNITAR/UNDP Centre on small energy resources, Rome, 71-92.
- Truesdell, A.H., Lippmann, M.J., Quijano, J.L., and D'Amore, F., 1995. Chemical and physical indicators of reservoir processes in exploited high-temperature, liquid-dominated geothermal fields. *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, Florence, Italy, 1933-1938.

*(Figuras en las páginas siguientes)*

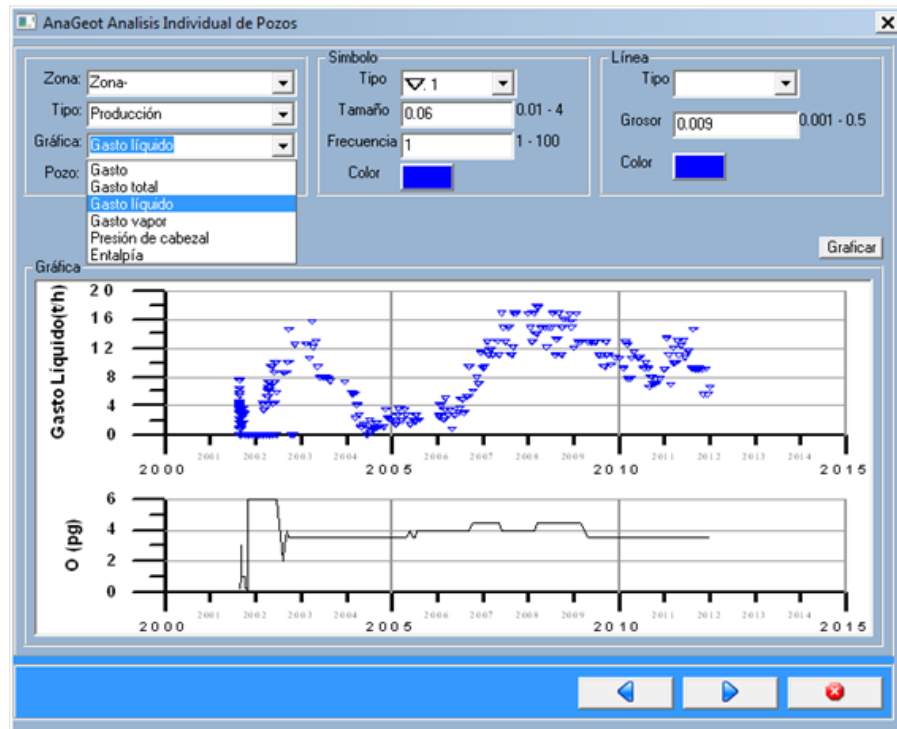


Fig. 1. Generación de gráfica de gasto total del pozo 1A.

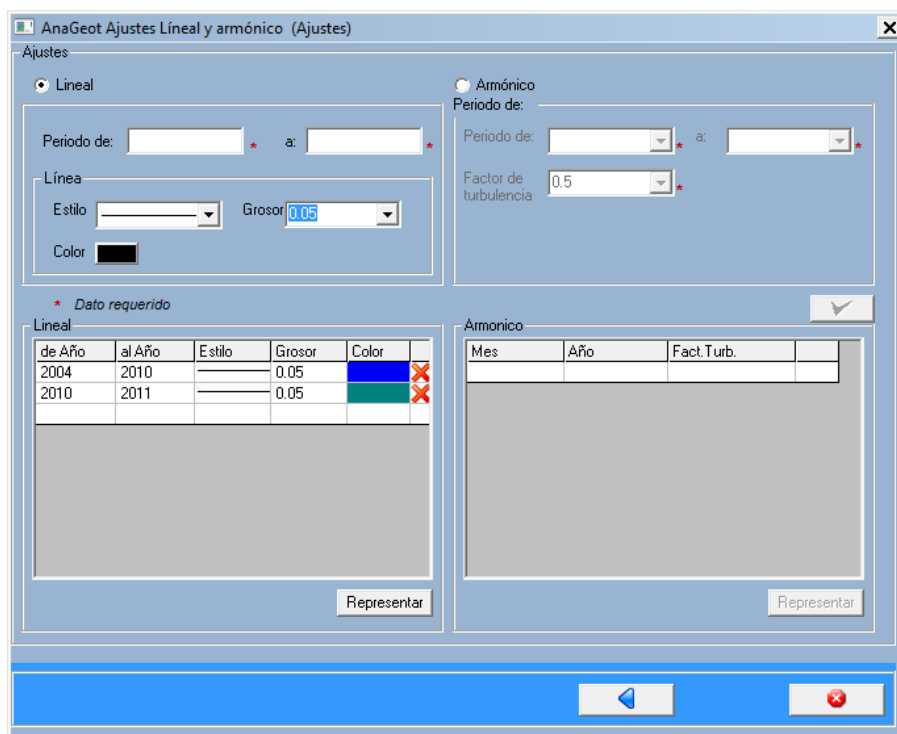


Fig. 2. Ventana de Ajuste lineal y Ajuste armónico.



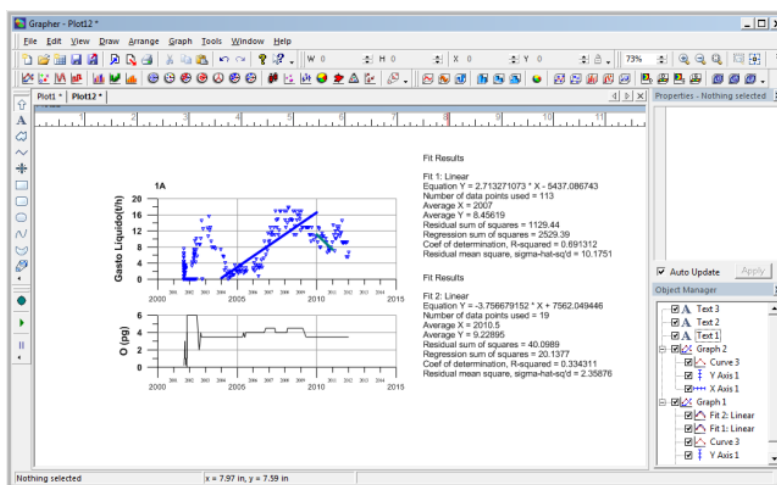


Fig. 3. Representación gráfica del ajuste lineal utilizando el programa Grapher.

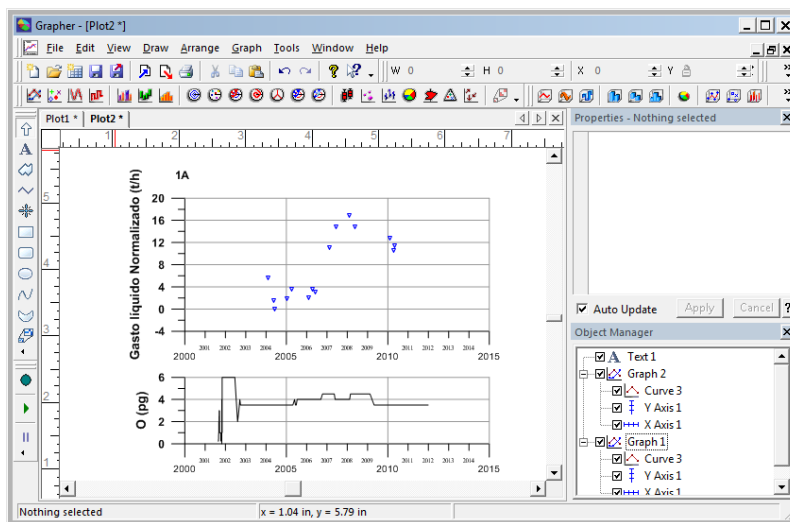


Fig. 4. Representación gráfica del ajuste armónico calculado utilizando el programa Grapher.

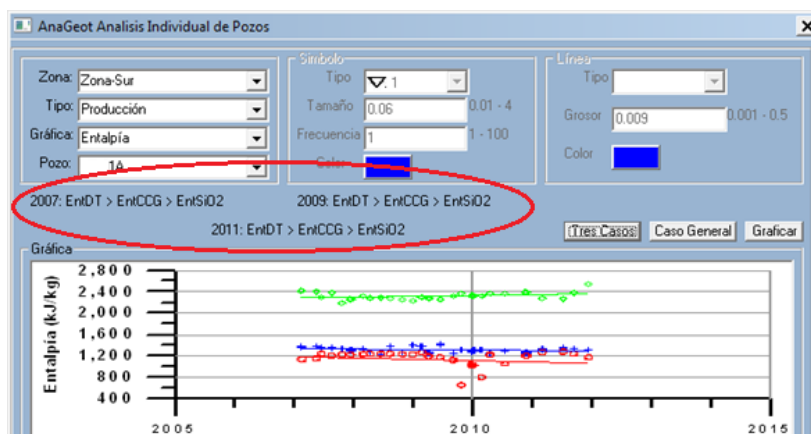


Fig. 5. Análisis de Comportamiento de entalpías en tres casos para el pozo 1A

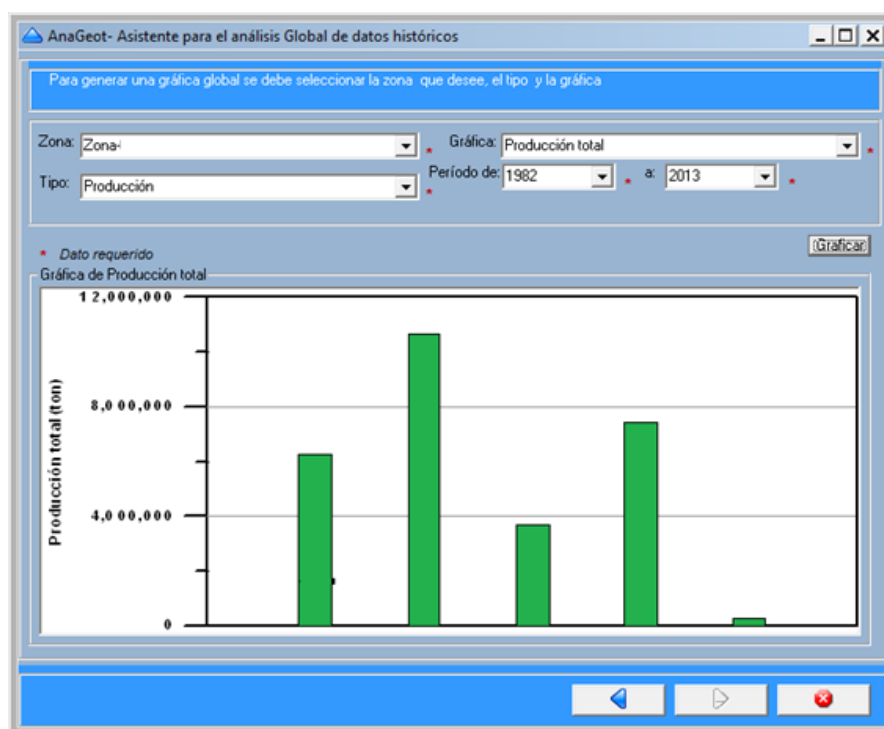


Fig. 6. Representación gráfica de la producción total para un grupo de pozos.

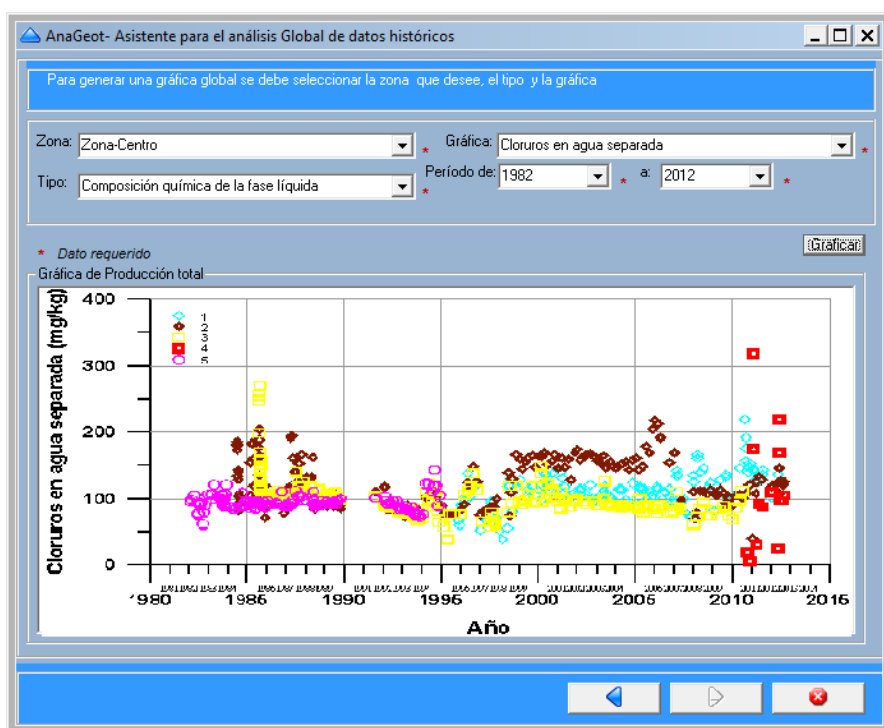


Fig. 7. Representación gráfica de los cloruros en agua separada para un grupo de pozos.

**Reporte de Gastos**

Para generar un reporte se deben seleccionar los pozos o el grupo de pozos que desee

☒ Por Zona    ☐ Por Pozo    Tipo de Reporte: Años Efectivos de Producción

Zona: Zona- 1    Título:

Pozo:     Período de: 1982 a: 2013

Frec. Muestreo: 30 días    días aprox.

Pozo	Años Efectivos	Periodo	
1	10.8	1982 - 1994	✗
2	23.5	1984 - 2013	✗
3	21.2	1985 - 2010	✗
4	13.9	1995 - 2011	✗
5	1.8	2011 - 2013	✗

Fig. 8. Ventana de Reporte de gastos con la tabla de años efectivos de producción para un grupo de pozos.

Producción global - Microsoft Word

Pozo	Años Efectivos de Producción	Periodo
1	10.75	1982 - 1992
2	13.917	1995 - 2010
3	12.417	1999 - 2012
4	19.5	1986 - 2012
5	23.333	1984 - 2012

Página: 2 de 7    Palabras: 272    Español (México)    100%

Fig. 9. Reporte generado desde el módulo de Reporte de Gastos.

Documento99 - Microsoft Word

Archivo Inicio Control de cambios Insertar Diseño de página Referencias Correspondencia Revisar Vista

Portapapeles Fuente Párrafo Estilos

**Campo-Zona-1**

Pozo	Vapor (ton/año)	Líquido (ton/año)	Total (ton/año)
1	2,229,512	4,026,060	6,255,572
2	9,984,251	716,227	10,700,478
3	2,762,604	946,264	3,708,868
4	2,896,731	4,602,262	7,498,993
5	284,723	33,357	318,080
Promedio	3,631,564	2,064,834	5,696,398

Página: 1 de 1 Palabras: 33 Español (México) 100%

Fig. 10. Ejemplo de reporte generado de producción total de gas para un grupo de pozos.

Reporte de declinaciones

Para generar un reporte se deben seleccionar los pozos o el grupo de pozos que desee

Zona: Zona 1 Tipo de Reporte: Cambios de líquido, vapor y mezcla

Pozo: 2 Título: FT: 0.75

Período de: 1984 a: 2013

Año inicial para tomar orificio constante: 1991

Tabla

Pozo	Liq/Lineal	Liq/Armónico	Vap/Lineal	Vap/Armónico	Mez/Lineal	Mez/Armónico	Periodo	meses
2	0.018	0.001	-0.011	-0.228	0.007	-0.227	Jul 1984 - Abr 2013	346
1	-6.875	-	-2.267	-	-9.142	-	Jun 1982 - Feb 1994	×
2	0.018	0.001	-0.011	-0.228	0.007	-0.227	Jul 1984 - Abr 2013	×

Reporte pozo Generar Cancelar

Fig. 11. Ventana de reporte de declinaciones del líquido, vapor y mezcla.

**Inyección**

☒ Por Zona    ☐ Por Pozo    Tipo de Reporte: Promedio Anual Inyección

Zona: Zona 2    Título:   
 Pozo:    Nombre Archivo: prueba

Período de: 1985    a: 2013    **Tabla**

**Promedio Anual Inyección**

Año	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Promedio	Eliminar
2002		1392.845	676.356	1034.6	X
2003		1726.699	853.042	1289.871	X
2004		1485.937	1497.973	1491.955	X
2005		1127.222	1142.315	789.943	X
2006		960.478	858.128	727.025	X
2007		490.08	490.498	458.818	X
2008		649.715	643.568	474.337	X
2009		635.993	652.851	514.723	X
2010		695.719	666.78	541.128	X
2011		776.551	801.804	621.944	X
2012		429.347	1453.608	728.612	X
2013		154.661	2827.46	1109.155	X

Genera hoja    **Generar**    Cancelar

Fig. 12. Ventana de reporte de inyección con el reporte de promedio anual de inyección de un grupo de pozos (Zona 2).

prueba [Modo de compatibilidad] - Microsoft Ex...

Archivo Inicio Inserta Diseño Fórmu Datos Revisa Vista Progra Equip...

Calibri 11

Pegar Fuente Alineación Número Estilos Celdas Modificar

	A	B	C	D	E	F
	Año	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Promedio	
1						
2	1995		1892		1892	
3	1996		3399.87		3399.87	
4	1997		3169.155		3169.155	
5	1998					
6	1999		2608.95	712.847	1660.899	
7	2000		1722.719	714.832	1218.776	
8	2001		1406.827	540.095	973.461	
9	2002		1392.845	676.356	1034.6	
10	2003		1726.699	853.042	1289.871	
11	2004		1485.937	1497.973	1491.955	
12	2005		1127.222	1142.315	789.943	
13	2006		960.478	858.128	727.025	
14	2007		490.08	490.498	458.818	
15	2008		649.715	643.568	474.337	
16	2009		635.993	652.851	514.723	
17	2010		695.719	666.78	541.128	

Historico Hoja2 Hoja3

100%

Fig. 13. Reporte generado en Excel del promedio anual de inyección de un grupo de pozos.