

## **Uso de un Sistema de Información Geográfica para inventariar el estado físico del aislamiento térmico de la red de vaporductos del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC**

**Juan Ignacio Martínez Estrella<sup>1</sup>, Alfonso García Gutiérrez<sup>1</sup>, Rosember Ovando Castelar<sup>1</sup>, Cinthya Gutiérrez Lara<sup>1,2</sup>, Ismael Canchola Félix<sup>3</sup>, Paul Jacobo Galván<sup>3</sup>, Carlos Miranda Herrera<sup>3</sup> y Othón Mora Pérez<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor. Correo: [jime@iie.org.mx](mailto:jime@iie.org.mx). <sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Zacatepec, Zacatepec, Mor. <sup>3</sup>Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia General de Cerro Prieto, Mexicali, BC.

### **Resumen**

El sistema de producción y transporte de fluidos del campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) está compuesto por 165 pozos integrados y 165.7 km de tuberías con diámetros de 8" a 48", de los cuales 92.1 km corresponden a la red de alta presión (AP), 47.6 km a la red de baja presión (BP) y 26 km a mezclaductos (M). Las tuberías están térmicamente aisladas con material a base de lana mineral o fibra de vidrio, y una cubierta exterior de aluminio o hierro. Como parte de un estudio enfocado a la estimación de las pérdidas de calor en la red de transporte en función del estado físico que guarda aislamiento térmico, se requirió integrar un inventario de la condición actual del aislante considerando cuatro diferentes calidades: (A) nuevo o completo con protección metálica, (B) bueno o sin lámina, (C) regular o deteriorado y (D) ausente o destruido totalmente. El inventario fue levantado mediante inspección visual en campo y posteriormente implementado dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) lo cual permitió identificar las zonas de la red susceptibles a presentar las mayores pérdidas de calor y facilitó la cuantificación detallada de las longitudes correspondientes a cada clasificación del aislante para cada red (AP, BP, M) y para cada diámetro de tubería operando en el CGCP. De acuerdo al inventario, el 80-82% de la longitud de cada una de las tres redes de ductos que conforman el sistema de transporte tiene aislantes correspondientes a las calidades A y B, y el restante 18-20% tiene aislantes con calidades C y D. Mientras que los resultados de este trabajo fueron utilizados en el cálculo global de la transferencia de calor a través de los ductos, la metodología empleada y los datos generados pueden ser utilizados en otras aplicaciones prácticas relacionadas con la operación, diseño y mantenimiento del sistema de producción y transporte de fluidos del CGCP.

*Palabras clave:* Campo Geotérmico Cerro Prieto, red de tuberías, aislamiento térmico, pérdidas de calor, Sistema de Información Geográfica.

## **Using GIS for inventorying the thermal insulation condition of the Cerro Prieto, BC, geothermal field steam pipeline network**

### **Abstract**

The Cerro Prieto geothermal field steam production and transportation system is constituted by 165 producing wells and 165.7 kilometers of pipes with diameters ranging from 8" to 48" from which 92.1 km belong to the High Pressure steam pipeline network (AP), 47.6 km to the Low Pressure steam pipeline network (BP) and 26 km to mixture pipelines (M). The pipes are thermally insulated with a mineral wool or fiber glass layer and an external aluminum or iron cover. As part of a study on the evaluation of the heat losses due to thermal insulation condition in the transportation network, it was necessary to inventory the current insulation condition considering four different insulation qualities:

(A) new or complete, with metallic cover, (B) good or without metallic cover, (C) regular or damaged and (D) totally destroyed or absent. The inventory was carried out through visual inspection in the field and afterwards implemented into a Geographical Information System (GIS). This tool successfully helped to easily identify those parts of the network where heat losses may be higher, and facilitated the precise quantification of the length corresponding to each insulation quality for each pipeline network (AP, BP, M) and to each pipe diameter. According to the inventory results, 80-82% of the total length of the three networks has thermal insulations belonging to A and B qualities, and the remaining 18-20% has insulations with qualities C and D. While the results of this work were directly used in the heat loss calculations of the entire transportation network, the methodology employed and generated datasets can be used in other applications related with the design, operation, and maintenance of the CPGF production and transportation system.

**Keywords:** Cerro Prieto geothermal field, steam transportation network, heat losses, thermal insulation condition, GIS.

## Introducción

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema computarizado que permite la captura, mantenimiento, análisis, integración y despliegue de cualquier dato relacionado a una localización o un mapa. En el contexto de los recursos energéticos del subsuelo, trátase de hidrocarburos o geotermia, la tecnología SIG tiene un enorme potencial de utilización, debido a que la mayor parte de los datos y decisiones asociados con la exploración, explotación, recolección, transporte y manejo de estos recursos involucran invariablemente un componente geográfico. En el caso de la industria petrolera los SIG han sido utilizados ampliamente y demostrado ser una herramienta invaluable para el almacenamiento, visualización, correlación, análisis y compartición de datos, así como la toma de decisiones en las distintas etapas que la conforman, desde la exploración geológica hasta el manejo de puntos de venta (Gaddy, 2003; Acharya, 2003).

En lo que al ámbito geotérmico se refiere, a pesar de que éste guarda varias similitudes con la industria petrolera, el uso de los SIG se ha enfocado típicamente hacia aplicaciones relacionadas al campo de las geociencias siendo utilizada como una herramienta para la generación de bases de datos espaciales, sistemas de mapeo automatizado y la creación de modelos basados en el conocimiento para la identificación de zonas con potencial geotérmico, así como la selección de sitios para pozos y plantas generadoras (Prol-Ledesma, 2000; Martínez-Estrella *et al.*, 2005; Lara-Cuervo, 2006; Noorollahi *et al.*, 2007; Yousefi y Ehara, 2008; García-Estrada *et al.*, 2008). Algunas aplicaciones más específicas reportadas en la literatura incluyen: apoyo para la interpretación de la estructura geológica en áreas geotérmicas; apoyo para la caracterización de yacimientos; visualización y análisis de datos isotópicos; almacenamiento y visualización de imágenes digitales de núcleos y datos asociados (Nash, 1999); visualización y análisis de pruebas de trazadores (Nash y Adams; 2001).

A pesar de ser una tecnología relativamente reciente, la utilización de los SIG en diversas áreas del conocimiento e industrias, en particular la petrolera, ha generado una gran cantidad de conceptos, metodologías, modelos de bases de datos, así como un número de casos de estudio que bien pueden ser adoptados, adaptados y aplicados en geotermia, no solo en aspectos relacionados con la exploración y desarrollo de campos, sino también con la explotación y manejo de los recursos geotérmicos y la infraestructura (instalaciones superficiales) asociada a campos geotérmicos actualmente en operación.

Un trabajo interesante es el de Setijadji *et al.* (2005) quienes proponen de manera preliminar un modelo de datos digitales aplicado a bases de datos geotérmicas y ejemplifica su implementación mediante tres

casos prácticos aplicados a campos geotérmicos en la isla de Java, Indonesia, utilizando como plataforma el paquete SIG comercial ArcGIS. Aunque en su trabajo nuevamente enfatiza en datos geológicos, resulta muy interesante el uso de conceptos y metodologías diseñados para otras aplicaciones, no utilizados tradicionalmente en geotermia, como el uso de sistema de referenciación lineal para gestionar información de pozos geotérmicos.

En este trabajo, se presenta un ejemplo de aplicación práctica de un SIG en la red de transporte de fluidos del campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), B.C., consistente en la elaboración de un inventario detallado del estado físico que guarda el aislamiento térmico de las tuberías que conforman la red de ductos que transportan el fluido geotérmico desde los pozos hasta las plantas geotérmicas. La integración de este inventario permitió la generación de información que posteriormente fue utilizada para la estimación de las pérdidas de calor desde las tuberías hacia el medio ambiente a través de toda la red de transporte.

## 1. Antecedentes

El sistema de producción y transporte de fluidos del campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) está integrado actualmente por 165 pozos productores y 165.7 km de tuberías con diámetros de 8 a 48". Originalmente, estas tuberías fueron térmicamente aisladas con una capa de 2" de espesor de material a base de lana mineral o fibra de vidrio, y una cubierta exterior de aluminio o hierro. No obstante con el paso del tiempo, este aislamiento ha ido sufriendo distintos grados de deterioro en algunas porciones de la red.

Entre los años 2006-07 el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) realizó para la Residencia General de Cerro Prieto (RGCP) de CFE un estudio sobre modelado y simulación numérica del flujo de vapor a través de toda la red de vaporductos (García *et al.*, 2006), en el cual un resultado muy importante fue la detección de diversas áreas de oportunidad para mejorar la operación de la red y aumentar el aprovechamiento energético del fluido extraído del yacimiento. Entre otras, se encontró que una fuente importante de pérdida de energía durante el transporte de fluidos desde los pozos hasta las centrales generadoras, está asociada a las pérdidas de calor ocasionadas por el deterioro o la ausencia del aislamiento térmico en ciertas porciones de la red.

En el marco de un estudio recientemente efectuado por García *et al.* (2009), cuyo principal objetivo fue la evaluación de la eficiencia energética del sistema de producción y transporte de fluidos del CGCP, se efectuó un análisis e interpretación de las principales fuentes de pérdida de energía a través de la red, donde se incluyó la cuantificación de las pérdidas de calor desde la red de tuberías al medio ambiente en función del estado que guarda el aislamiento en los principales vaporductos y colectores.

La determinación de estas pérdidas de calor, requirió la determinación de la longitud y diámetro de cada tramo de tubería, de la diferencia de temperatura global y del coeficiente global de transferencia de calor. Esto se expresa de manera general en la siguiente ecuación:

$$Q = U A \Delta T \quad (1)$$

donde:

$U$ : Coeficiente global de transferencia de calor

$A$ : es el área de la tubería, definida por  $\pi DL$

$\Delta T$ : es la diferencia de temperatura

Las pérdidas de calor están en función del estado físico del aislante y del área de la sección de tubería definida por su diámetro. El área  $A$  es directamente proporcional a la longitud  $L$  y al diámetro  $D$  de la tubería, por lo cual se requirió conocer la longitud  $L$  relacionada a cada condición del aislante, para cada diámetro  $D$  de tubería. En general, a mayor diámetro de tubería, mayor área y por ende, mayor pérdida de calor para un mismo estado físico del aislante. De esta manera, para llevar a cabo dicha estimación se requirió levantar un inventario detallado en campo para determinar la condición física del aislante térmico en cada ducto de la red, el cual se llevó a cabo durante el mes de junio de 2009.

## 2. Metodología

Puesto que en el CGCP la condición del aislamiento térmico varía actualmente desde nuevo hasta ausente (tubería descubierta) pasando por varios grados de daño o deterioro, para este trabajo se determinó clasificar la condición del aislante dentro de cuatro diferentes niveles o estados, de acuerdo a la Tabla 1, asignando un color para representar cada caso. La figura 1 muestra ejemplos representativos en campo de cada categoría de aislamiento definida para este trabajo.

Estado o condición del aislante	Clave	Color
Nuevo o completo, con lámina	A	Blue
Bueno o sin lamina	B	Green
Regular o visiblemente deteriorado	C	Yellow
Malo o ausente, destruido totalmente	D	Red

Tabla 1. Claves y código de colores empleado para la clasificación del estado físico del aislante.



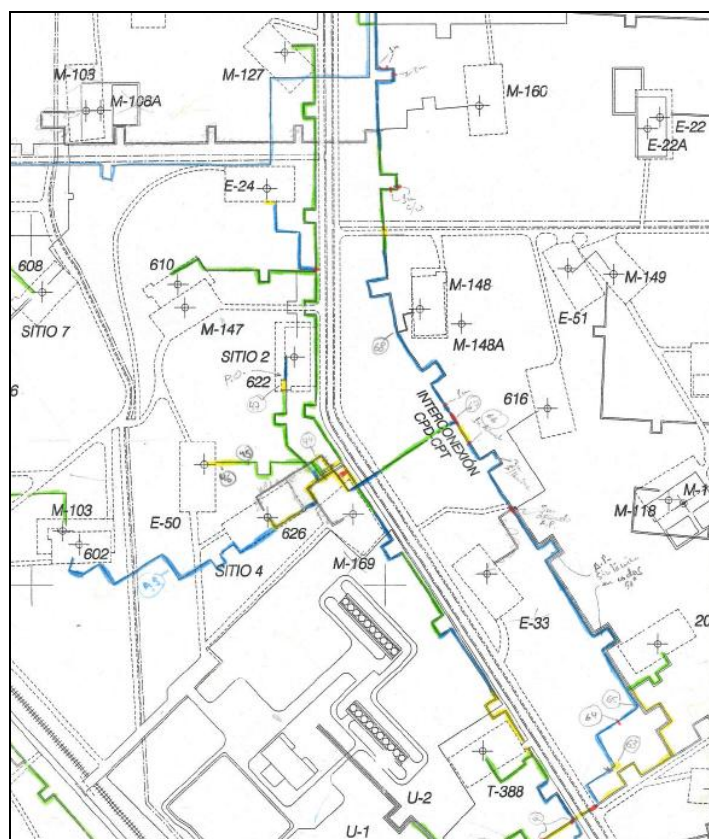
Figura 1. Fotografías de campo representativas de cada clasificación del estado físico del aislante: A) Nuevo o completo; B) Bueno, sin lámina; C) Regular ; D) Ausente o destruido totalmente.



## 2.1 Levantamiento en campo

Se efectuaron recorridos a lo largo de cada ducto de la red incluyendo tanto líneas de vapor como de mezcla, para clasificar mediante simple inspección visual la condición del aislante y paralelamente registrar la localización de cada tramo de aislamiento clasificado sobre copias en papel del plano base de la red de vaporductos del CGCP generado por CFE en formato AutoCAD, empleando los criterios establecidos y el código de colores mostrado en la Tabla 1. La figura 2 muestra un ejemplo del registro de campo llevado a cabo durante el levantamiento. Aunque el método pareciera algo rudimentario, este se realizó de forma muy cuidadosa con el fin de localizar y señalar en el plano la ubicación precisa de cada tramo clasificado.

Durante el levantamiento también se tomaron fotografías de los vaporductos y sus aislantes para su eventual consulta. Cabe mencionar que en el levantamiento únicamente se recorrieron los ductos que se encontraban en operación en junio de 2009, excluyendo aquellos que se encontraban fuera de servicio.



*Figura 2. Ejemplo del registro de campo del estado del aislante térmico de vaporductos del CGCP*

## 2.2 Procesamiento de información

La información levantada en campo fue posteriormente procesada con el fin de facilitar su manejo y posterior implementación dentro de un SIG con el cual se llevó a cabo el cálculo de longitudes de aislamiento de acuerdo a su estado físico o condición, y correlacionarlo con los diferentes sistemas (alta presión, baja presión, mezcla, etc.), así como con los distintos diámetros de tuberías que conforman el sistema de transporte de fluidos del CGCP. El procesado incluyó las siguientes etapas:

### **a. Revisión y adecuación del plano base de la red de ductos del CGCP.**

Se actualizó el plano base de la red de vaporductos del CGCP para:

- Incluir información faltante y corregir imprecisiones.
- Edición de líneas que representan las tuberías de manera que todas fueran continuas.
- Conversión de líneas a polilíneas.
- Clasificación por medio de capas de las diferentes categorías de ductos siguiendo más o menos una estructura jerárquica: ramal o colector principal, subcolector, interconexión, mezcladucto, vaporducto individual de pozo, etc., indicando asimismo los ductos pertenecientes a los sistemas de alta y baja presión.
- Integración en una sola capa de aquellos ductos que se encontraban fuera de operación.
- Eliminación de las líneas que representaban tuberías que ya no se encuentran físicamente en campo.
- Adición de etiquetas con la información de diámetros de tubería de los ductos, con el fin de facilitar la posterior correlación de pérdidas de calor por estado de aislamiento con el diámetro de tubería.

### **b. Implementación dentro del SIG**

Un SIG permite representar y modelar infraestructura, como la asociada al sistema de transporte de fluidos del CGCP, como una serie de vectores organizados en capas (similar a Autocad), a los cuales se les pueden asociar datos alfanuméricos que representan los atributos de los objetos representados, los cuales quedan almacenados en una base de datos. En el caso de la red de ductos del CGCP, cada polilínea representa la trayectoria o ruta que un ducto sigue dentro del campo

Para el presente trabajo se utilizó el paquete comercial ArcGIS con licencia de ArcEditor (ESRI 2008). Este programa permite leer archivos CAD para explorarlos y posteriormente importarlos seleccionando todas o únicamente las capas de interés. Para el caso de este trabajo se seleccionaron las capas que incluían las polilíneas que representaban a los ductos de vapor y de mezcla que se encontraban en operación en junio de 2009.

Una vez implementadas las capas de interés dentro del SIG, primeramente se asignó una clave de identificación única a cada polilínea, empleando un código compuesto por un prefijo que indica el grupo jerárquico del ducto (R-ramal, C-colector, SC-subcolector, IC-interconexión, V-vaporducto, M-mezcladucto) seguida del número o nombre asignado a cada ducto que generalmente corresponde al pozo de donde inicia o el número de ramal definido, y al final el sufijo AP, BP ó M para distinguir si el ducto está integrado al sistema de transporte de vapor de alta o baja presión, o transporta mezcla.

El siguiente paso consistió en llevar a cabo la conversión de las polilíneas simples a *rutas*. En ArcGIS las *rutas* constituyen líneas que en su geometría (vértices) incluyen coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , y un cuarto valor  $m$  que significa *measure*, medida o estación. Estos valores  $m$  son valores continuos y en el caso de ductos típicamente se incrementan en la dirección de movimiento de los fluidos. Para el caso de la red del CGCP, ésta se modeló como una red totalmente horizontal y los valores de estación  $m$  fueron establecidos con base en la distancia o longitud acumulativa desde el inicio de cada ducto según el plano base y que corresponde a la salida de la válvula de esfera localizada a la salida de los separadores de los pozos, o bien, al inicio de cada ramal o colector.

Dado que el sentido de digitalización de algunas de las polilíneas creadas originalmente en AutoCAD era contrario al del movimiento de los fluidos, fue necesario invertir el sentido de digitalización de esas polilíneas de manera que el primer par de coordenadas de dichas polilíneas pasara a ser el último y viceversa, y posteriormente se restablecieron los valores de estación  $m$  de las rutas, representando éstos la distancia acumulativa medida a partir del nuevo punto de origen, es decir, del nuevo primer par de coordenadas.

Una gran ventaja de modelar las trayectorias de los ductos como *rutas* en el SIG es que permite integrar un número de componentes o eventos que se encuentran localizados u ocurren a lo largo de la misma, con base en su posición relativa. En el ambiente SIG este método se conoce como sistema de *referenciación lineal* (en inglés, *linear referencing* o *stationing*), el cual puede definirse como un sistema de referencia en el cual los objetos o eventos operativos son localizados con base a una medida a lo largo de un elemento lineal (Brennan, 2002). Así, este sistema es adecuado para el manejo de datos relacionados a objetos del mundo real de naturaleza lineal como: carreteras, vías férreas, líneas de transmisión eléctrica y de datos, ríos y ductos. El sistema está diseñado de manera que si un segmento de una ruta es cambiado, solamente aquellos valores de distancia en el segmento cambiado requieren ser actualizados.

En este sistema cada elemento en la ruta es localizado ya sea mediante un punto (en inglés se denomina *milepoint*) o mediante un segmento. Por ejemplo, en el caso de un vaporducto los elementos puntuales pueden ser válvulas, placas de medición, etc., mientras que los elementos lineales pueden ser obviamente tuberías, aislamientos, etc. Asimismo se pueden incorporar *eventos* operativos como la condición del aislamiento, registros de espesor de pared de tubería, etc. pueden ser incorporados utilizando este sistema.

### c. Elaboración de tablas de *eventos*

Para poder localizar cada elemento o evento operativo a lo largo de una ruta, el sistema de referenciación lineal requiere la creación de tablas denominadas *tablas de eventos*, las cuales contienen la información de las ubicaciones de ruta y los atributos de los elementos. Entre estos atributos, cada elemento deberá contar invariablemente con la clave de la ruta donde está instalado, así como su posición contada desde el inicio de la ruta. En el caso de elementos lineales, se requieren dos valores de posición, inicial y final.

En este trabajo, una vez implementada la red de ductos (rutas) en el SIG y a partir de la información sobre el estado de los aislantes recabada en campo y registrada en los planos en papel, se crearon las tablas de *eventos* en forma de una base de datos en MS Excel conteniendo los distintos estados de aislante encontrados en cada ducto recorrido.

La Tabla 2 muestra un ejemplo de lo mencionado, donde se observa que cada registro incluye además de la clave asignada al ducto, el tipo jerárquico de ducto, el sistema AP, BP o M, la clasificación del estado del aislamiento, así como la posición o distancia inicial y final de cada segmento o sección de condición de aislamiento según su clasificación asignada en campo con respecto al punto inicial de cada ducto (ruta). Por ejemplo, se observa que el estado del aislamiento a lo largo del ducto del pozo 301 corresponde al tipo C, mientras que en el ducto del pozo 102 la condición del aislamiento es muy heterogénea.

Los valores de posición inicial y final de cada tramo o segmento mostradas en la tabla corresponden a los obtenidas con el SIG a partir de las distancias establecidas a partir del origen de cada ducto.

Clave_ducto	Tipo_ducto	Sistema	Condición aislante	Tramo ini	Tramo fin
V105-AP	Vaporducto	AP	B	0.000	169.701
V107-AP	Vaporducto	AP	B	0.000	143.476
V107-AP	Vaporducto	AP	D	143.476	145.476
V301-AP	Vaporducto	AP	C	0.000	257.401
V302-AP	Vaporducto	AP	B	0.000	114.123
VM19A-AP	Vaporducto	AP	C	0.000	156.703
VM19A-AP	Vaporducto	AP	B	156.703	226.102
VM19A-AP	Vaporducto	AP	C	226.102	291.727
VM20-AP	Vaporducto	AP	C	0.000	115.294
VM30-AP	Vaporducto	AP	B	0.000	141.123
VE2-AP	Vaporducto	AP	C	0.000	277.858
V102-AP	Vaporducto	AP	B	0.000	69.002
V102-AP	Vaporducto	AP	A	69.002	117.006
V102-AP	Vaporducto	AP	D	117.006	118.006
V102-AP	Vaporducto	AP	B	118.006	200.970
V605-AP	Vaporducto	AP	B	0.000	134.038
V605-AP	Vaporducto	AP	D	134.038	138.038

Tabla 2. Ejemplo de tabla de eventos con datos del estado de aislamiento térmico

El traslado de la información de la condición del aislante del plano en papel al SIG se efectuó mediante simple aproximación visual insertando sobre las rutas un vértice en cada posición donde había un cambio en el estado del aislante. Una vez insertados los vértices necesarios, se procedió a actualizar los valores  $m$  de todos los vértices de la ruta obteniendo así de forma automática el valor de distancia inicial y final correspondiente a cada segmento. Aunque este método podría parecer algo impreciso, tratándose del cálculo de una estimación gruesa, se considera que el nivel de detalle resultó más que suficiente para los fines del estudio principal.

### 2.3 Generación de mapas del estado de aislamiento

Una característica de los SIG es el presentar información en forma gráfica sobre un mapa digital. La utilización del método de referenciación lineal y tablas de *eventos* permite asociar múltiples series de atributos del ducto, así como desplegarlos en forma de capas, consultarlos, analizarlos y actualizarlos de una manera no-convencional, y sin afectar la geometría subyacente de la ruta que define al ducto.

El proceso que permite visualizar de manera gráfica la geometría de elementos a partir de una serie de datos que no tienen una geometría real como los *eventos* mostrados en la Tabla 2 se denomina *Segmentación Dinámica* (Brennan, 2002; Cadkin y Brennan, 2002). Las figuras 3 y 4 ilustran la mecánica de este proceso, y ejemplifican el manejo dado a la información relacionada al inventario de aislantes. Los eventos de la tabla son ligados a la correspondiente ruta (ducto) a través de la clave de identificación única asignada. Si se cambia algún atributo de la *tabla de eventos* entonces el mapa se actualiza de forma dinámica. Esto representa sin duda una gran ventaja sobre la representación de la condición de los aislantes como simples líneas con geometría estática.

De este modo, se generaron mapas del estado del aislamiento para los sistemas o redes de alta presión, baja presión y mezclaductos del CGCP (figuras 5 a 7).



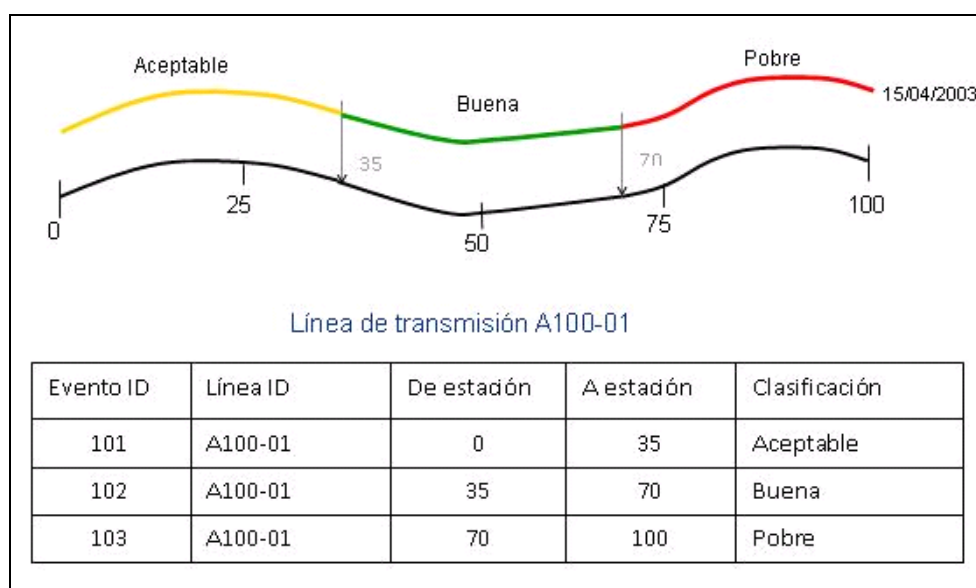


Figura 3. Referenciación Lineal y Segmentación Dinámica.

Este mismo procedimiento se utilizó para elaborar una tabla de *eventos* con los diámetros de tubería de los ductos y posteriormente sus correspondientes mapas, incluyendo todos los ductos del campo operando el mes de junio de 2009.

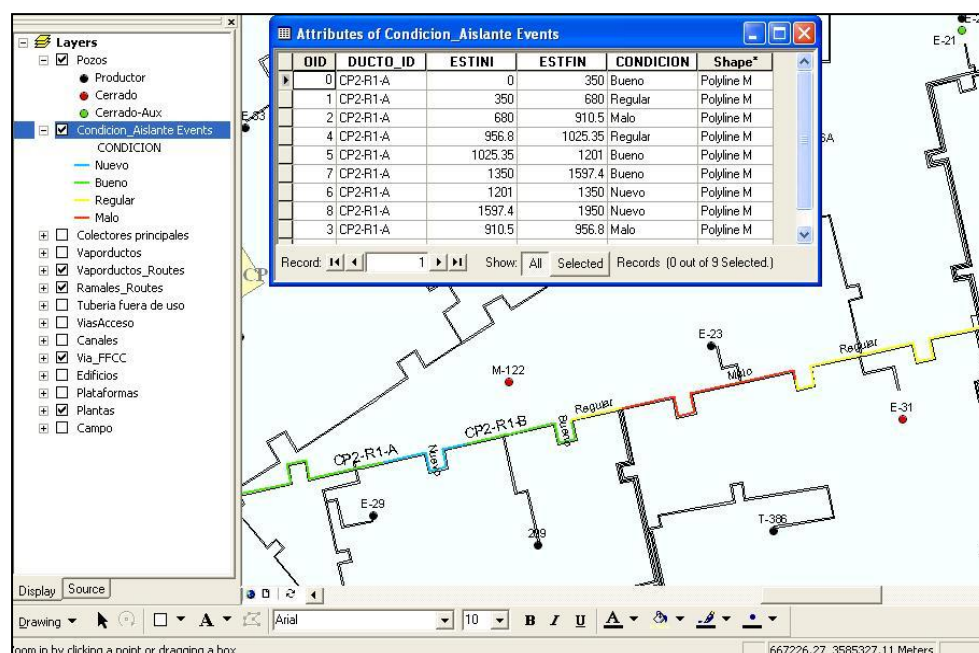


Figura 4. Ejemplo de visualización gráfica del estado del aislante térmico a partir de una tabla de eventos.

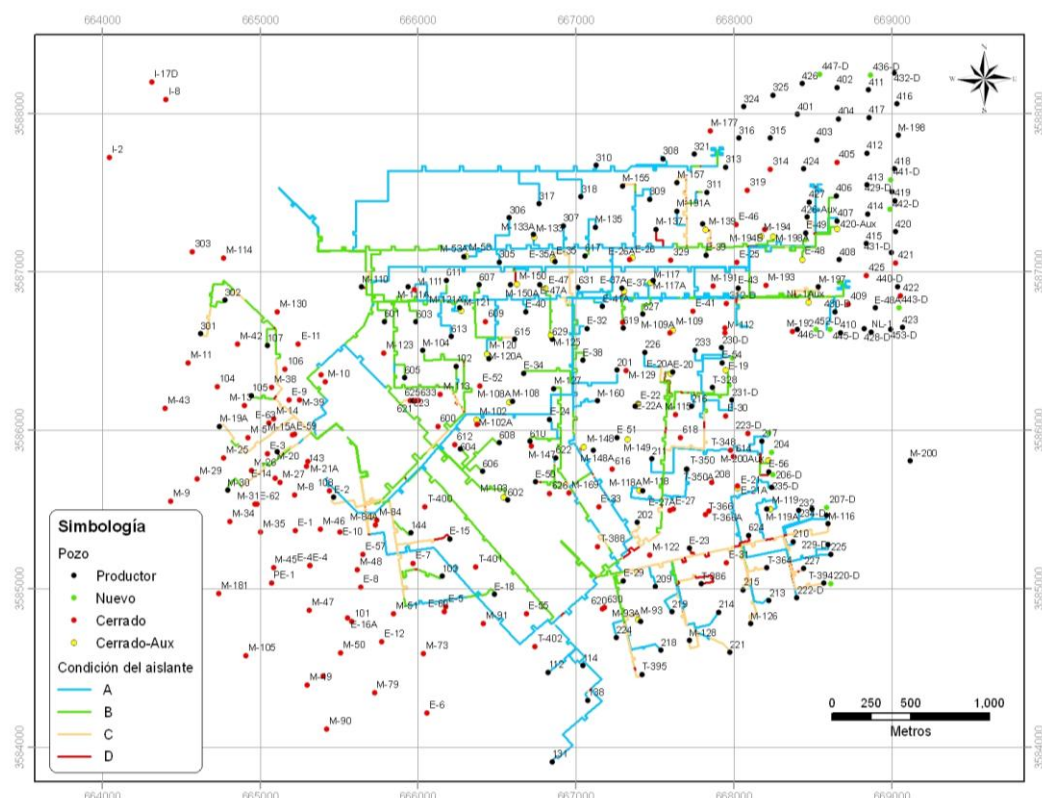


Figura 5. Mapa del estado del aislamiento térmico de la red de ductos de alta presión.

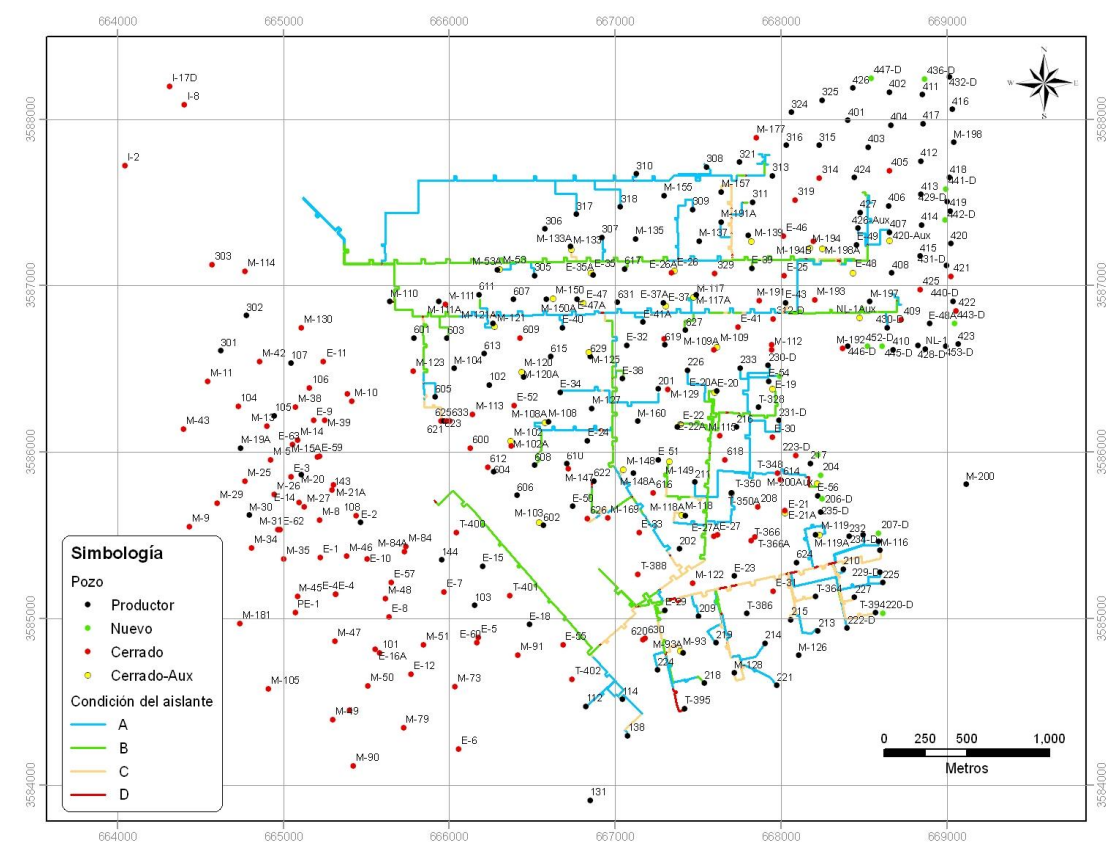


Figura 6. Mapa del estado del aislamiento térmico de la red de ductos de baja presión.

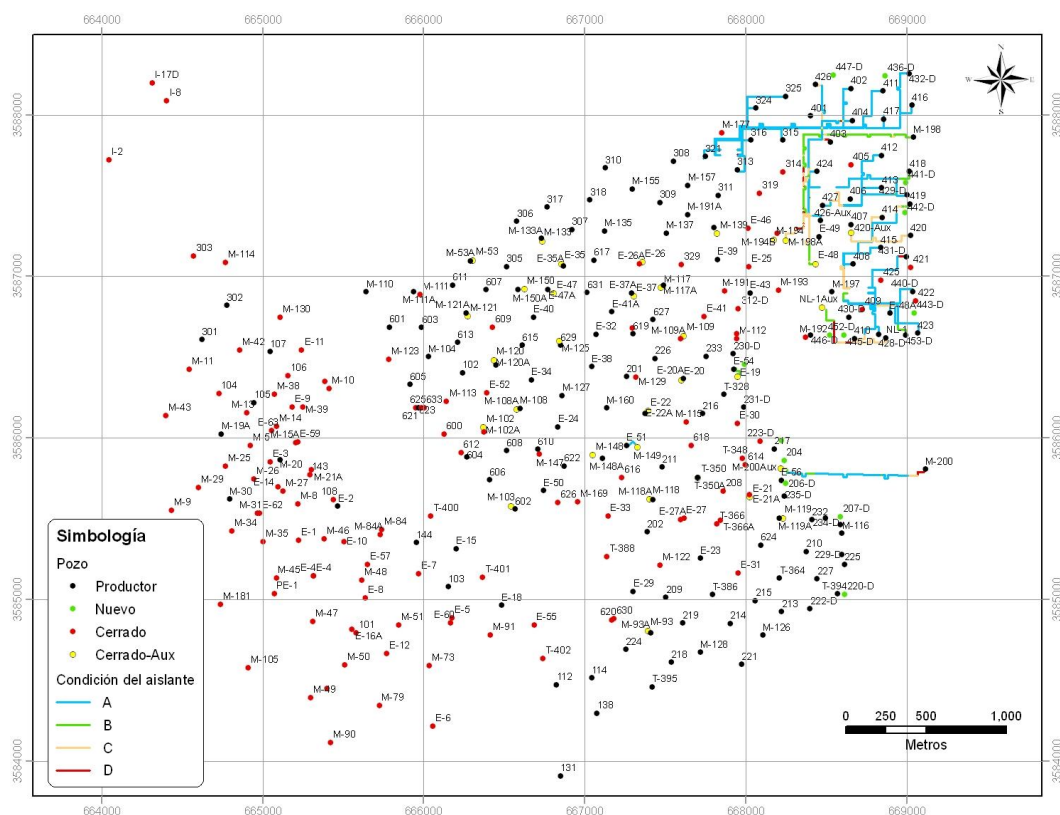


Figura 7. Mapa del estado del aislamiento térmico de la red de mezclaductos.

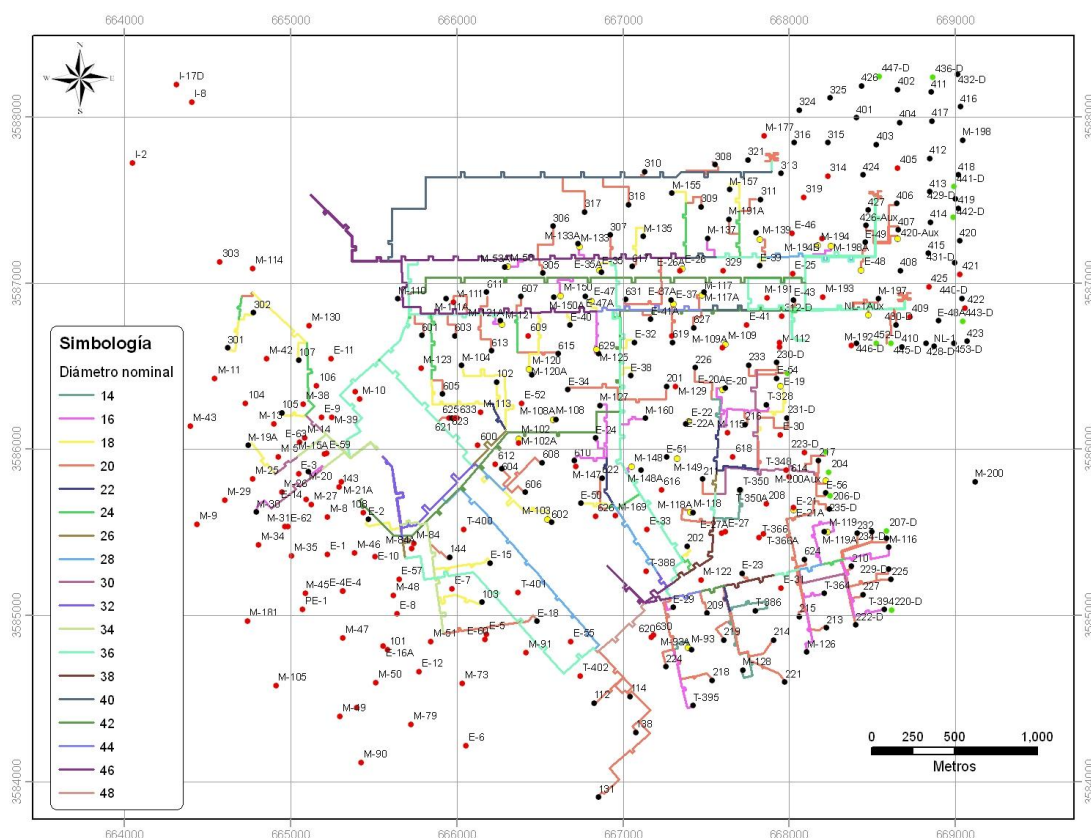


Figura 8. Mapa de diámetros de tuberías de la red de ductos de alta presión.

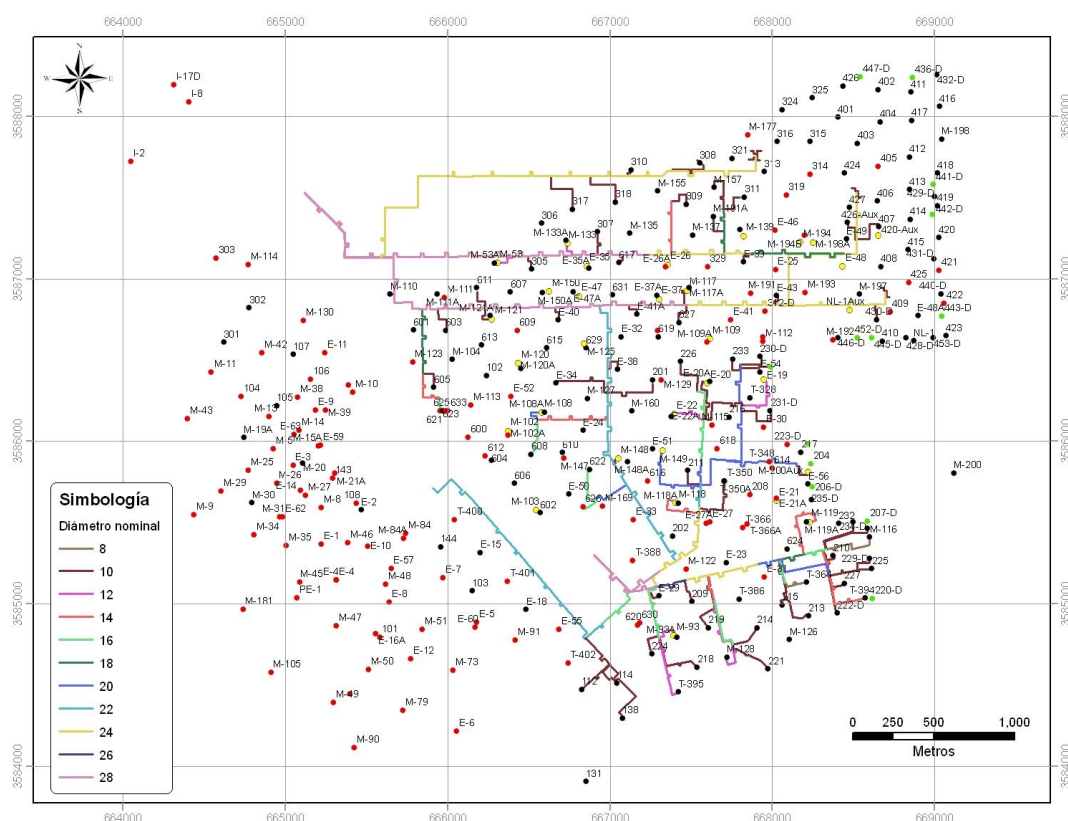


Figura 9. Mapa de diámetros de tuberías de la red de ductos de baja presión.

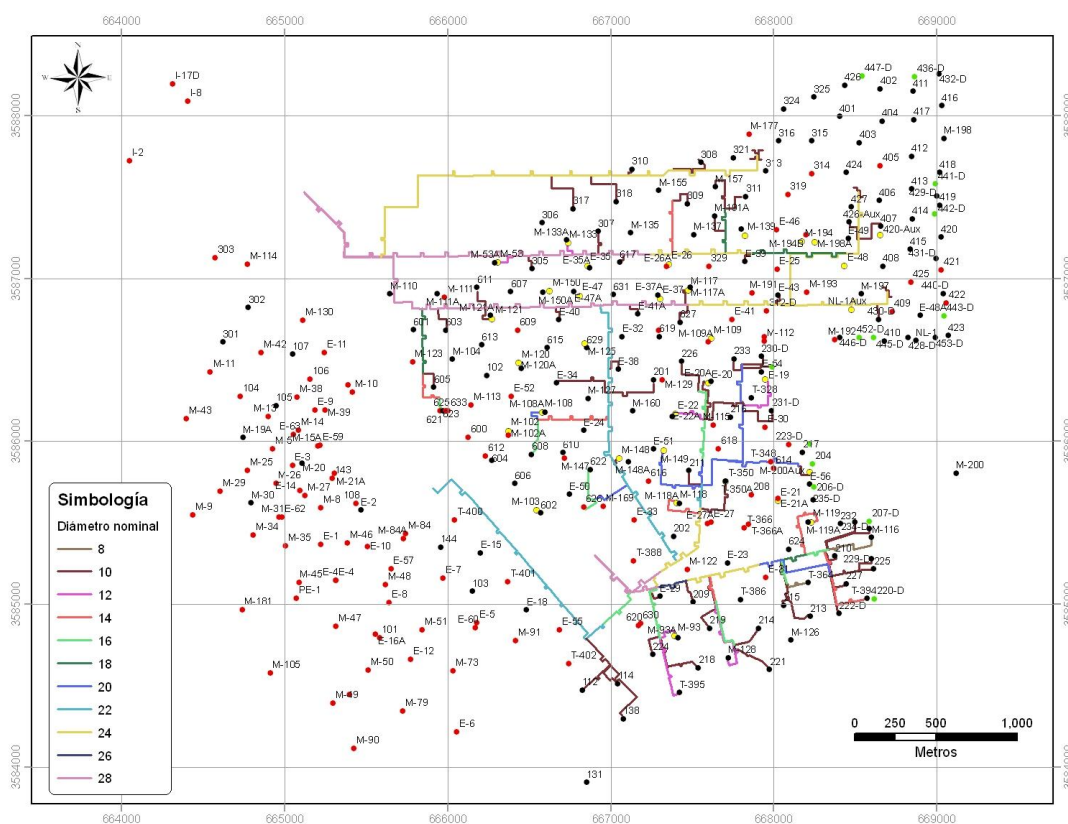


Figura 10. Mapa de diámetros de tuberías de la red de mezclaductos



## 2.4 Análisis de mapas

Una vez generados los mapas del estado de aislamiento y de diámetros de tubería, se procedió a cuantificar las longitudes correspondientes a cada clasificación del aislamiento según su estado físico y para cada diámetro de tubería, considerando además a qué sistema de transporte están integrados (AP, BP, M). Para tal fin, utilizando las capacidades de análisis espacial del SIG, se llevaron a cabo un gran número de operaciones de selección y sobre-posición espacial entre los mapas de aislantes y de diámetros.

Tratándose del método de referenciación lineal, la sobre-posición de geometrías generadas a partir de dos tablas de eventos lineales (estado de aislante y diámetro de tubería) se denomina sobre-posición línea-sobre-línea (*line-on-line*) y da como resultado una nueva tabla de eventos lineales que puede ser la intersección o unión lógica de las tablas de entrada. Para este caso, las tablas resultantes se obtuvieron de la intersección entre los segmentos correspondientes a cada una de las cuatro clasificaciones de condición de aislamiento y los segmentos pertenecientes a cada diámetro de tubería. Considerando que existen cuatro categorías de aislamiento, y una gran variedad de diámetros de tubería en la red de ductos, nos puede dar una idea de la gran cantidad de operaciones de intersección realizadas.

## 3. Resultados

Las estadísticas finales de la cuantificación de longitudes en metros de los distintos estados del aislante son presentadas en las Tablas 3 a 7. La Tabla 3 presenta un resumen global de las longitudes de tubería del sistema de transporte de fluidos por cada sistema de producción (AP, BP y M) y el porcentaje que ocupa cada una en relación con la longitud total de tubería del CGCP. La cuantificación incluye solo aquellos ductos que se encontraban en operación en el mes de junio de 2009.

RED COMPLETA			
Red de ductos del CGCP	Sistema	Longitud (m)	%
	AP	92078.906	55.56
	BP	47622.712	28.74
	Mezcla	26017.787	15.70
	<b>TOTAL CP</b>	<b>165719.405</b>	<b>100.00</b>

*Tabla 3. Estadísticas globales de longitudes de tuberías de la red de ductos del CGCP.*

La Tabla 4 muestra las estadísticas correspondientes a la sumatoria de cada estado o condición del aislante para cada sistema de producción.

Los resultados detallados de la longitud de cada condición de aislante para cada diámetro de la red de alta presión se muestran en la Tabla 5, mientras que la Tabla 6 muestra las estadísticas correspondientes al sistema de conducción de baja presión. La Tabla 7 muestra las estadísticas para la red de mezclaductos. Los diámetros están expresados en pulgadas.



Sistema	Condición del aislante	Longitud (m)	%
RED AP	A	44197.763	48.00
	B	30283.234	32.89
	C	14958.022	16.24
	D	2639.884	2.87
	<b>Total AP</b>	<b>92078.903</b>	<b>100.00</b>
RED BP	A	23041.470	48.38
	B	16091.515	33.79
	C	7384.856	15.51
	D	1104.871	2.32
	<b>Total BP</b>	<b>47622.712</b>	<b>100.00</b>
MEZCLA	A	18612.723	71.54
	B	2329.807	8.95
	C	4470.710	17.18
	D	604.546	2.32
	<b>Total Mezcla</b>	<b>26017.787</b>	<b>100.00</b>
<b>TOTAL CP</b>		<b>165719.402</b>	

Tabla 4. Longitudes totales de los diferentes estados de aislamiento térmico de tuberías de la red de ductos del CGCP correspondientes a cada sistema.

					CONDICIÓN DEL AISLANTE (longitud, m)				
Sistema	Tipo de ducto	Diámetro nominal (pulg)	Longitud (m)	%	A	B	C	D	Subtotales
RED AP	Vaporducto	14.000	1549.337	4.510	370.821	0.000	905.486	273.030	1549.337
		16.000	5945.647	17.308	1333.115	1965.370	2195.190	451.972	5945.647
		18.000	6515.226	18.966	1038.569	3536.787	1726.800	213.071	6515.226
		20.000	19711.993	57.383	13002.164	4262.862	1697.738	749.226	19711.990
		22.000	306.673	0.893	0.000	0.000	306.673	0.000	306.673
		24.000	322.921	0.940	320.921	0.000	0.000	2.000	322.921
		SubTotal	34351.797	100.000	16065.590	9765.019	6831.887	1689.298	34351.794
	Subcolector	14.000	244.536	2.586	0.000	244.536	0.000	0.000	244.536
		18.000	548.773	5.802	0.000	411.920	127.839	9.014	548.773
		20.000	2066.807	21.853	908.304	657.231	501.271	0.000	2066.807
		22.000	531.760	5.623	0.000	518.848	0.912	12.000	531.760
		24.000	2076.375	21.954	442.489	778.602	822.294	32.991	2076.375
		28.000	877.076	9.274	225.942	462.704	188.431	0.000	877.076
		30.000	2111.725	22.328	2098.917	12.808	0.000	0.000	2111.725
		32.000	214.929	2.273	116.805	97.540	0.585	0.000	214.929
		36.000	785.649	8.307	0.000	785.649	0.000	0.000	785.649
	SubTotal	9457.632	100.000	3792.457	3969.839	1641.331	54.005	9457.632	
	Ramal	18.000	608.236	1.260	53.514	542.722	0.000	12.000	608.236
		22.000	570.610	1.182	0.000	341.075	154.115	75.420	570.610
		24.000	941.873	1.951	159.685	512.354	188.397	81.437	941.873
		26.000	989.110	2.049	0.000	379.715	573.932	35.463	989.110
		28.000	2914.242	6.037	23.790	2323.340	476.790871	90.322	2914.242
		30.000	1397.226	2.895	24.671	603.222	749.334	20.000	1397.226
		32.000	2021.966	4.189	0.000	1419.936	595.030	7.000	2021.966
		34.000	2770.503	5.740	58.508	951.712	1758.694	1.589	2770.503
		36.000	14093.617	29.198	7669.791	5364.814	876.185	182.827	14093.617
		38.000	1092.176	2.263	0.000	247.670	526.348	318.158	1092.176
		40.000	4302.011	8.912	4110.236	164.242	17.966	9.567	4302.011
		42.000	7588.057	15.720	7342.491	47.061	198.505	0.000	7588.057
		44.000	1035.320	2.145	713.755	72.621	248.944	0.000	1035.320
		46.000	7381.699	15.293	3648.470	3577.891	120.563	34.774	7381.699
		48.000	562.830	1.166	534.806	0.000	0.000	28.024	562.830
		SubTotal	48269.477	100.000	24339.716	16548.376	6484.804	896.581	48269.477
		Totales	92078.906		44197.763	30283.234	14958.022	2639.884	92078.903

Tabla 5. Estadísticas detalladas de longitudes de cada condición de aislamiento térmico para la red de ductos de alta presión.

Sistema	Tipo de ducto	Diámetro nominal (pulg)	Longitud (m)	%	CONDICIÓN DEL AISLANTE (longitud, m)				
					A	B	C	D	Subtotales
RED BP	Vaporducto	8.000	548.037	3.156	0.000	0.000	548.037	0.000	548.037
		10.000	11917.172	68.631	9017.095	1924.109	828.074	147.894659	11917.172
		12.000	2037.419	11.733	348.181	587.239	868.613	233.386	2037.419
		14.000	1461.772	8.418	752.238	0.000	709.534	0.000	1461.772
		16.000	724.883	4.175	53.370	457.504	176.490	37.519	724.883
		20.000	674.929	3.887	134.381	342.459	181.089	17.000	674.929
		<b>SubTotal</b>	<b>17364.213</b>	<b>100.000</b>	<b>10305.264</b>	<b>3311.311</b>	<b>3311.838</b>	<b>435.799</b>	<b>17364.213</b>
	Subcolector	10.000	1052.259	17.085	552.177	0.000	500.081	0.000	1052.259
		14.000	1162.028	18.867	927.411	171.032	18.960121	44.624	1162.028
		16.000	1247.587	20.257	282.759	556.583	408.245	0.000	1247.587
		18.000	355.685	5.775	0.000	0.000	329.685	26.000	355.685
		20.000	2341.347	38.016	2147.446	129.688	64.213	0.000	2341.347
		<b>SubTotal</b>	<b>6158.906</b>	<b>100.000</b>	<b>3909.794</b>	<b>857.303</b>	<b>1321.185</b>	<b>70.624</b>	<b>6158.906</b>
	Ramal	14.000	309.075	1.282	84.945	0.000	224.130	0.000	309.075
		16.000	823.313	3.416	0.000	312.174	423.027	88.112	823.313
		18.000	1464.097	6.075	60.071	971.881	359.200	72.945	1464.097
		20.000	379.495	1.575	0.000	165.222	179.505	34.768	379.495
		22.000	4353.871	18.066	787.960	3163.048	338.942	63.921	4353.871
		24.000	8535.232	35.416	5190.141	2223.745	976.405	144.942	8535.232
		26.000	228.186	0.947	0.000	19.374	114.927	93.885	228.186
		28.000	8006.325	33.222	2703.296	5067.457	135.697	99.875	8006.325
		<b>SubTotal</b>	<b>24099.594</b>	<b>100.000</b>	<b>8826.412</b>	<b>11922.901</b>	<b>2751.833</b>	<b>598.448</b>	<b>24099.594</b>
		<b>Total</b>	<b>47622.712</b>		<b>23041.470</b>	<b>16091.515</b>	<b>7384.856</b>	<b>1104.871</b>	<b>47622.712</b>

Tabla 6. Estadísticas detalladas de longitudes de cada condición de aislamiento térmico para la red de ductos de baja presión.

Sistema	Tipo de ducto	Diámetro nominal (pulg)	Longitud (m)	%	CONDICIÓN DEL AISLANTE (longitud, m)				
					A	B	C	D	Subtotales
MEZCLA	Mezcladucto	10.000	1683.490	6.471	0.000	1197.912	338.872	146.707	1683.490
		16.000	23191.706	89.138	18526.178	992.411	3257.650	415.467	23191.706
		20.000	1142.591	4.392	86.545	139.485	874.188	42.373	1142.591
		<b>Total</b>	<b>26017.787</b>	<b>100.000</b>	<b>18612.723</b>	<b>2329.807</b>	<b>4470.710</b>	<b>604.546</b>	<b>26017.787</b>

Tabla 7. Estadísticas detalladas de longitudes de cada condición de aislamiento térmico para la red de ductos de mezcla.

De acuerdo con los resultados del inventario, para los tres sistemas o redes de transporte, AP, BP y M, existe una coincidencia en la proporción de la longitud correspondiente a aislantes considerados en buen estado (calidades A y B), y los aislantes con condición regular o mala (calidades C y D). Los aislantes nuevos o en buen estado representan el 80-82% de la longitud total, mientras que el restante 18-20% de la longitud total tiene aislamientos en condición regular o mala, que es donde se ocurran las mayores pérdidas de calor. Por otro lado y en relación con el aislante tipo A, en el caso de los mezclaductos, la proporción de aislante nuevo es notoriamente mayor que en las redes de ductos de vapor.

Asimismo, es evidente que en general el estado del aislante presenta mayor deterioro en ductos que tienen más tiempo en operación, como es el caso de los ramales de los sectores CPU y CPD (en particular el Ramal 1), hecho que de alguna manera era esperado.

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se describió la metodología y los resultados de un inventario del estado físico que guarda el aislamiento térmico de las tuberías de la red de transporte de fluidos del CGCP. El inventario fue levantado en campo considerando cuatro categorías distintas de calidad de aislante de

acuerdo con su grado de deterioro: (A) nuevo o completo con protección metálica, (B) bueno o sin lámina, (C) regular o deteriorado y (D) ausente o destruido totalmente.

La información recopilada en campo fue integrada junto con el plano base de la red de transporte de fluidos del CGCP dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el fin de facilitar el manejo, despliegue y análisis de los datos del inventario.

La utilización del SIG y del método de referenciación lineal para modelar la red de ductos y la condición del aislamiento térmico, permitió la cuantificación detallada de las longitudes de cada categoría de aislamiento por cada diámetro de tubería existente en la red de ductos, tomando también cuenta el sistema en donde cada tubería opera: vapor de AP o BP, o mezcladucto. Desde la perspectiva de los autores se considera que este resultado hubiera sido muy difícil de lograr sin el uso de esta herramienta.

De acuerdo al inventario, el 80-82% de la longitud de cada una de las tres redes de ductos que conforman el sistema de transporte (AP, BP y M) tiene aislantes correspondientes a las calidades A y B, mientras el restante 18-20% tiene aislantes con calidades C y D. Los sectores de la red donde los aislantes presentan mayor grado de deterioro, y por tanto, son susceptibles de presentar una mayor transferencia de calor hacia el medio ambiente, corresponden a CPU y CPD (Ramal 1). Esto se relaciona con el tiempo de operación de estas tuberías.

Los resultados de este trabajo fueron empleados posteriormente como un parámetro fundamental de entrada para la estimación global de las pérdidas de calor asociadas al estado físico del aislante térmico de las tuberías de la red de transporte de vapor desde los pozos hasta las plantas generadoras.

Se integró una base de datos geográfica preliminar concerniente a la infraestructura superficial del CGCP, la cual puede ser actualizada con información de futuros inventarios del estado de aislamiento u otros componentes de la red de ductos, modificaciones en la geometría de la red, o inclusive tomarse como base para la integración de un inventario completo de la infraestructura existente en el CGCP. Su implementación en el SIG posibilitaría probar otras aplicaciones prácticas relacionadas con aspectos operativos, mantenimiento y diseño del sistema de transporte.

Sobre este último punto, sería muy recomendable disponer de un plano digital actualizado del CGCP generado a partir de un estudio fotogramétrico de precisión, de manera que toda la información concerniente a la infraestructura superficial se encuentre debidamente georeferenciada. Esto permitiría conformar una base de datos más confiable que pueda ser utilizada por todas las áreas del campo para efectuar futuros levantamientos de información de distintos tipos con apoyo de dispositivos de localización satelital (GPS) y mapeo en tiempo real.

**Agradecimientos:** Se agradece a las autoridades del Campo geotérmico de Cerro Prieto de la Comisión Federal de Electricidad y del Instituto de Investigaciones Eléctricas por el apoyo y permiso para la realización de la presente publicación. Los resultados fueron obtenidos como parte del contrato CFE/I/SC/13391/2009 entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad.

## Referencias

Acharya, A., 2002. GIS and the petroleum industry. Geospatial application paper in: <http://www.gisdevelopment.net/application/miscellaneous/misc029pf.htm>

- Brennan, P., 2002. *Linear referencing in ArcGIS*. ESRI, 2002, 165 p.
- Cadkin, J. y Brennan, P., 2002. Dynamic segmentation in ArcGIS. *ArcUser*, July-September, 2002, 52-54.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute), 2008. *ArcGIS version 9.3*. ESRI, Redlands, CA, USA.
- Gaddy, D.E. (2003). *Introduction to GIS for the Petroleum Industry*. 1<sup>st</sup> American Edition, PennWell Corporation, Tulsa, OK, USA, 287 p. ISBN 0-87814-804-3.
- García-Estrada, G.H., López-Hernández, A. y Quijano León J.L. (2008). Selection of new drill sites using a Geographic Information System (GIS) at Los Azufres, Mexico. *Geotermia*, Vol. 21, No.2, pp. 43-76.
- García, A., Martínez, J.I., Hernández, A.F., Ceceñas, M., Ovando, R., Salaices, E., Canchola, I., Mora, O., Gutiérrez, S., Miranda, C., Hernández, M. y López, S., 2006. Numerical simulation of the Cerro Prieto steam pipeline network. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 30, 19-23.
- García Gutiérrez, A., Martínez Estrella, J.I. y Ovando Castelar, R., 2009. “Evaluación y optimización de la eficiencia del ciclo geotérmico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto: Parte 1 - Sistema de producción y transporte de fluidos geotérmicos”, Informe Final, Clave IIE/11/13743/I 02/F/DC, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Mor.
- Lara-Cuervo, J.G., 2006. Aplicación de métodos de Sistema de Información Geográfica al campo geotérmico Los Humeros y a la zona geotérmica de Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. Tesis licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura-IPN, México D.F., 364 p. Inédito.
- Nash, G.D., 1999. The geo-spatial data IT paradigm for the next century: Awibengklok core example. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 23, 31-34.
- Nash, G.D. y Adams, M.C., 2001. Cost effective use of GIS for tracer test data mapping and visualization. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 25.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H. y Tanaka T., 2007. Geothermal resources exploration and wellsite selection with environmental consideration using GIS in Sabalan geothermal area, Iran. *Proceedings Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 22-24, 2007.
- Prol-Ledesma, R.M., 2000. Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS. *Geothermics*, Vol. 29, pp. 83-103.
- Setijadji, L.D., Watanabe, K., Wahyuningsih R. and Wintolo D., 2005. Towards the Digital Data Model for Geothermal Databases: Technology Trends, Fundamental Concepts, Case Study of

Java Island, and Preliminary Data Model. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*. Antalya, Turkey, 24-29 April.

Yousefi, H. and Ehara S., 2008. GIS integration method for geothermal power plant sitting in Sabalan area, NW Iran. *Proceedings Thirty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* Stanford University, Stanford, California, January 28-30.