

Contexto ambiental del desarrollo del campo geotérmico de Los Humeros, Pue.

Eugenio J. Pastrana-Melchor, María Elena Fernández-Solórzano, Ernesto Mendoza-Rangel y Cuauhtémoc Hernández-Ayala

CFE, Alejandro Volta 655, Col. Electricistas, Morelia, 58290, Mich.

Resumen

La construcción, operación y mantenimiento del campo geotermoeléctrico Los Humeros, Pue., se ha llevado a cabo dentro del marco jurídico ambiental vigente en México. Las resoluciones en materia de impacto ambiental, la licencia en materia de prevención de la contaminación de la atmósfera, el título de concesión para explotar, usar o aprovechar aguas nacionales, el permiso para descargar aguas residuales domésticas, el registro como empresa generadora de residuos peligrosos, y el cumplimiento de las disposiciones y condicionantes establecidos en cada uno de estos documentos, evidencian la observancia de la legislación ambiental aplicable al proyecto.

Palabras Clave: México, Los Humeros, impacto ambiental, marco jurídico ambiental, prevención, mitigación y restauración de impactos.

Environmental framework for the development of the Los Humeros, Pue., geothermal field

Abstract

The construction, operation and maintenance of the Los Humeros, Pue., geothermal field were undertaken in accordance with Mexican environmental regulations. The resolutions on environmental impacts, license for atmospheric pollution prevention, concession title for exploitation and use of national waters, permission for wastewater discharging services, company registration for producing dangerous wastes and fulfillment of all conditions noted in the documents show the applicable environmental laws for the project have been followed.

Keywords: Mexico, Los Humeros; environmental impact; environmental laws; impact prevention, mitigation and restoration.

1. Introducción

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) inició en los años setenta una serie de estudios exploratorios en las zonas termales de la República Mexicana con objeto de localizar sitios con posibilidades de aprovechar el recurso geotérmico para la generación de energía eléctrica. Una de las áreas exploradas se encuentra ubicada en la porción oriental del Estado de Puebla y occidental del Estado Veracruz, a la que se le llamó Los Humeros, por encontrarse dentro de ella el pueblo del mismo nombre. Esta zona comprendía una superficie de 4534 ha. En 1981 se limitó el área de exploración a 45 ha (1% de la zona de interés geotérmico) y se perforaron los primeros pozos productores de vapor geotérmico. En 1990 se inició la explotación de la energía con unidades de generación pequeñas que

pudieran ser reubicadas en el momento que se requiriera, con la instalación de la primera de siete unidades geotermoeléctricas a boca de pozo con una capacidad de 5 MW cada una.

Después de evaluada la capacidad del yacimiento y de haber generado anualmente del orden de 300 GWh por más de una década, se contempla en un futuro próximo instalar dos unidades a condensación de 25 MW cada una.

Aun cuando los trabajos de exploración, selección, preparación del sitio y construcción de las obras que conforman el sistema geotermoeléctrico se efectuaron de acuerdo con los Criterios Ecológicos CEOESEO04/89 (SEDUE, 1989a), se considera que la gestión ambiental del proyecto se inicia propiamente en 1993 con la presentación de la Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad General (MIA-G), para la instalación de unidades generadoras de 5 MW de capacidad, debido a que de ahí se deriva la resolución mediante la cual se autoriza la regularización de una obra que había comenzado en 1990 con la entrada en operación de las primeras dos unidades de ese tipo.

A continuación se presenta el marco jurídico ambiental que rige la operación del campo geotérmico de Los Humeros y las gestiones que se realizaron y se siguen realizando para dar cumplimiento a las disposiciones ambientales correspondientes. Asimismo, se mencionan las principales características de las autorizaciones otorgadas a la CFE y se informan las acciones, técnicas, datos y resultados obtenidos de aplicar las medidas de prevención y mitigación de impactos ambientales.

El propósito de este artículo es divulgar las actividades desarrolladas y los resultados obtenidos, para dar cumplimiento a las disposiciones establecidas en los permisos otorgados por las autoridades.

2. Marco Jurídico Ambiental

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) fue reformada en 1996. Los artículos de las leyes y reglamentos que aplicaban para el desarrollo de un campo geotermoeléctrico a principios de la década de los noventa se presentan en la Tabla 1. En esta se enuncia sucintamente a qué se refiere cada uno de esos artículos y en la Tabla 2 se presenta un resumen de los trámites que se realizaron para obtener las autorizaciones correspondientes a cada una de las materias referidas en la Tabla 1.

Como resultado de las gestiones efectuadas se obtuvieron los permisos respectivos, todos condicionados a diferentes disposiciones de la autoridad competente. A continuación se mencionan los datos más importantes de las licencias y las acciones que se han llevado a cabo para acatar las disposiciones.

Impacto Ambiental

Del análisis de la MIA-G (CFE,1992), así como de la Información Adicional (CFE, 1994), la Dirección General de Normatividad Ambiental (DGNA) de la entonces Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) determina, mediante el Resolutivo No. 448 (SEDESOL,1994), que el desarrollo del proyecto causará impactos ambientales adversos poco significativos, ya que:

- La zona no se encuentra dentro o cerca de un área natural protegida de interés para la Federación.
- La vegetación presente en el área está formada por estratos arbustivos (*Agave atrovirens*, *Agave lechugilla*, *Opuntia imbricata* y *Mammillaria sp.*), herbáceos (*Chenopodium album* y *Helenium sp.*) y arbóreos (*Arbustus glandulosa*, *Quercus crassipes*, *Yuca filifera*, *Abies religiosa*, *Pinus cembroides*, *Pinus moctezumae* y *Pinus teocote*), así como pastizales (*Muhlen bergia*).

- El efecto de la emisión de gases contaminantes durante la operación del proyecto es susceptible de mitigarse.

LEY	MATERIA	ART. No.	FRACC. No.	RELATIVO A:
LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE Y SUS REGLAMENTOS (DOF, 28 de enero de 1988)	Impacto Ambiental	28 L	--	Requerimiento de autorización para cualquier obra o actividad pública o privada, que pueda causar desequilibrios ecológicos o rebasar los límites y condiciones señaladas en los reglamentos y las normas en la materia.
		29 L	III	Evaluación del Gobierno Federal, por conducto de la Secretaría, a que se refiere el artículo 28, particularmente para las obras que se proyecten en algunas industrias como la de generación y transmisión de electricidad.
		5º. R	V	Ratificación del Artículo 29 de la Ley.
		6º. R	--	Requerimiento de presentar una manifestación de impacto ambiental (MIA) para obtener la autorización, en forma previa a la realización de la obra.
		9º. R	--	Las modalidades del estudio ambiental: en primera instancia se presentará una MIA general y de requerirse se solicitará una intermedia o específica.
		10 R	I - VI	La información mínima que deberá contener la MIA general.
		13 R	--	Requerimiento de información adicional que complemente la comprendida en la MIA.
		14 R	I	Tiempo en el que se evalúa la MIA-G y en su caso la información complementaria requerida, y en el que se dictamina la resolución de evaluación correspondiente.
	20 R	II	Tipos de autorizaciones. La fracción II corresponde a una condicionada.	
	Contaminación de la Atmósfera	18 R	--	Requerimiento de Licencia de Funcionamiento (LF) expedida por la Secretaría, para las fuentes fijas de jurisdicción federal que emitan olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera.
		19 R	I - XII	La obligación de presentar una solicitud por escrito para obtener la LF acompañada de la información que se describe en las doce fracciones de este artículo.
	Residuos Peligrosos	151 L	--	Requerimiento de autorización para la instalación y operación de sistemas para el manejo de residuos peligrosos.
		8º. R	I - XII	Lineamientos generales que un generador de residuos peligrosos debe observar para el manejo de sus residuos.
9º.-17 R		--	Procedimiento a seguir para cada una de las actividades que están involucradas en el manejo de los residuos y a las condiciones de construcción de almacén de estos.	
LEY DE AGUAS NACIONALES	Aguas	20-27 L	--	Concesiones y asignaciones de agua.
		28-29 L	--	Los derechos y obligaciones de concesionarios o asignatarios.
		30-32 L	--	Registro público de derechos de agua.
		31 R	I - VII	Forma en la que se realizará la solicitud de concesión o asignación y los documentos que se presentarán.
LEY FEDERAL DE DERECHOS	Aguas	222 L	--	Obligación al pago del derecho sobre agua por la explotación o aprovechamiento de aguas nacionales bien sea de hecho, o al amparo de títulos de concesión, autorización o permiso.
		224 L	V	Excepción del pago del derecho a que se refiere el Artículo 222 cuando las aguas regresen a su fuente original, previa autorización por la Comisión Nacional del Agua (CNA) en los términos de la Ley, siempre que cumpla con los lineamientos de calidad del agua señalados en esta fracción.

Notas: L: Ley, R: Reglamento.

Tabla 1. Marco jurídico ambiental

En consecuencia, la DGNA resuelve que la construcción, operación y mantenimiento del proyecto de Los Humeros es procedente, y la condiciona al cumplimiento de 13 términos y 25 subtérminos. El carácter y contenido de las condicionantes se observa en la Tabla 3.

MATERIA	DEPENDENCIA	TRÁMITE
Impacto Ambiental	DGNA-INE-SEDESOL	Presentación de la MIA-G para la instalación de unidades generadoras de 5 MW de capacidad en el Campo Geotérmico de Los Humeros (Abril, 1993).
		Entrega de la Información Adicional (IA) a la MIA-G (Marzo, 1994).
Prevención y Control de la Contaminación a la Atmósfera	SMA-DFP-SEMARNAP	Presentación de la solicitud para la LF de las fuentes fijas de emisión del Campo Geotermoeléctrico Los Humeros (Julio, 1993).
		Entrega de la Información Adicional a la LF solicitada (Abril y Agosto, 1995).
Residuos Peligrosos	SMA-DFP-SEMARNAP	Solicitud de registro como empresa generadora de residuos peligrosos (Febrero, 1997).
		Segunda solicitud de registro como empresa generadora de RP (Julio, 2000).
Aguas Nacionales	CNA	Solicitud del Título de Concesión para Explotar, Usar o Aprovechar Aguas Nacionales del subsuelo.
Derechos en Materia de Agua		Solicitud del permiso de descarga de aguas residuales del campo al yacimiento por medio de los pozos inyectores y del campamento a través de un sistema de tratamiento.

Notas: DGNA-INE-SEDESOL: Dirección General de Normatividad del Instituto de Ecología de la Secretaría de Desarrollo Social.
SMA-DFP-SEMARNAP: Subdelegación del Medio Ambiente de la Delegación Federal de Puebla de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
CNA: Comisión Nacional del Agua.

Tabla 2. Gestiones ambientales para dar cumplimiento al marco jurídico ambiental

TÉRMINO No.	CARÁCTER	RELATIVO A:
1	Obligatorio	Acatar lo establecido en los Criterios Ecológicos CE-OESE-004/89 (SEDUE, 1989a).
2	De advertencia	Área de los predios destinado a la construcción del proyecto y del campamento, los que no excederán, respectivamente, a las 44,8 ha y 25 ha manifestadas.
3.1-3.18	Obligatorio	Las medidas que se deben observar durante las diferentes etapas del proyecto.
3.19	Obligatorio	Mantener en el sitio de la obra la autorización del proyecto, la MIA y la IA, para mostrarlas a la autoridad competente que lo requiera.
4.1-4.6	Prohibitivo	Las actividades que no deben realizarse.
4.6	Prohibitivo	La modificación de las características técnicas del proyecto, de requerirse, notificar a la SEDESOL con toda oportunidad, para que determine lo procedente.
5 y 12	Informativo	Las características de la autorización.
6-9	Informativo	La forma y los plazos en los que se presentará un Programa General de las acciones que darán cumplimiento a los Términos y Disposiciones, así como de los informes de seguimiento.
10	De advertencia	La invalidación de la resolución en caso de incumplir alguno de los términos del uno al nueve, o modificar el proyecto descrito en la MIA y en la IA.
11	Informativo	Las facultades de vigilancia de la SEDESOL en el cumplimiento de las disposiciones establecidas en la autorización.
13	De instrucción	Satisfacer los requerimientos, normas y cualquier otro requisito de la SEDESOL o de otras autoridades.

Tabla 3. Estructura del Resolutivo No. 448

La CFE (1995a) dio respuesta a cada término y presentó los programas que se llevarían a cabo durante la vida útil del proyecto, como son:

- Manejo y rescate de especies de flora y fauna catalogadas en estado de conservación (Término 3.5).
- Restauración en las áreas en las que la CFE desmantele infraestructura (Término 3.7).
- Análisis continuo ambiental (monitoreo de aire y de agua) (Términos 3.10, 3.12 y 3.13).
- Seguimiento al programa de reforestación manifestado (Término 3.17).
- Mantenimiento de los caminos de acceso (Término 3.18).

En el Término 3.5 quedó establecido que la CFE debía elaborar un programa de manejo y rescate que asegurara la permanencia de alguna o algunas de las especies de flora o fauna catalogadas con algún estatus de conservación en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-1994, tales como el coyote (*Canis latrans*), el gato montés (*Linx rufus*), la salamandra (*Ambystoma mexicanus*) y el coralillo (*Micrurus sp.*), así como de especies raras amenazadas o en peligro de extinción que hubiese en la zona del proyecto de acuerdo con sus requerimientos de hábitat. Ello no obstante, la CFE (1995b) presentó al Instituto Nacional de Ecología (INE), una propuesta para llevar a cabo muestreos de flora y fauna con la finalidad de complementar los listados florísticos y faunísticos presentados en la MIA-G e identificar las especies con algún estatus de conservación, de acuerdo con la norma de referencia, toda vez que no era posible realizar trabajos de rescate debido a que el proyecto ya se encontraba en las etapas de construcción y operación.

En observancia del Término 4.6, en julio de 2000 la CFE dio aviso a las autoridades del INE-SEMARNAP del proyecto para instalar una unidad de ciclo binario de 300 kW como ampliación del sistema de generación de la Unidad 2 de 5 MW, bajo el esquema de uso eficiente de energía. Se solicitó dictaminar si las acciones relacionadas requerían ser evaluadas o si podían realizarse sin contar con autorización de ese Instituto, según lo establece el Artículo 6o. del Reglamento de la LGEEPA en Materia de Impacto Ambiental. La Dirección General de Ordenamiento Ecológico e Impacto Ambiental de ese Instituto no consideró necesario la presentación de un Informe Preventivo o MIA adicional para esta obra.

CONDICIONANTE		RELATIVA A:	SITUACIÓN
No.	CARÁCTER		
1	Específico	Las características de las fuentes fijas y de los turbogeneradores.	Atendido (Mayo, 1998).
2	De solicitud	Presentar a la PROFEPA, por única ocasión, el inventario de emisiones a la atmósfera.	Se presentaron inventarios de 1995, 1996 y 1997 (Mayo, 1998).
3	De solicitud	Presentar un programa de "minimización de emisiones en compuestos con alto contenido de azufre".	Solicitud de modificación "Medidas de minimización de emisiones de ácido sulfhídrico" (Mayo, 1998).
4	Obligatorio	Remitir a la PROFEPA en el mes de febrero de cada año la Cédula de Operación Anual (COA).	Atendido. A la fecha se han emitido seis COA(s).
5	Obligatorio	Los equipos de control de la contaminación de emisiones que instale la empresa deben funcionar de acuerdo con la normativa aplicable.	Reconsiderado ya que no aplica (Mayo, 1998).
6	Obligatorio	La solicitud para actualizar la Licencia de Funcionamiento, cuando haya cambios que incrementen concentraciones de contaminantes en el ambiente.	Atendido cuando las unidades estuvieron generando 6 MW (Octubre y Diciembre, 2000).
7	Obligatorio	Sujetarse a todas las disposiciones de la LGEEPA, sus Reglamentos y NOM(s) vigentes relativas a las actividades de la CFE.	Atendido.
8	Obligatorio	Participar en los planes de contingencia que instrumenten las autoridades ambientales.	Atendido.
9	Informativo	La Licencia de Funcionamiento no ampara ni libera trámites que la CFE deba realizar en otras materias.	Atendido.

Notas: PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

Tabla 4. Licencia de Funcionamiento No. 329, condicionantes y estado de cumplimiento

Prevención y Control de la Contaminación a la Atmósfera

A partir del análisis de la información presentada por la CFE en su solicitud, la Subdelegación del Medio Ambiente de la Delegación Federal de Puebla, concede la Licencia de Funcionamiento para Fuentes Fijas de Jurisdicción Federal No. 329, sujeta a nueve condicionantes (Tabla 4).

Residuos Peligrosos

A partir de 1999 la Superintendencia General Los Humeros quedó registrada en la Subdelegación referida como empresa generadora de materiales impregnados de aceite gastado (estopas y trapos). El registro se supedita al cumplimiento de seis condicionantes (Tabla 5).

CONDICIONANTE		RELATIVA A:	SITUACIÓN
No.	CARÁCTER		
1	Obligatorio	Remitir reporte semestral de manejo de residuos peligrosos acompañado de sus respectivos manifiestos de entrega, transporte y recepción.	A la fecha se han entregado a la delegación once reportes.
2	Obligatorio	Registrar en una bitácora todos los movimientos relacionados con el manejo de residuos peligrosos.	Se registran y controlan por bitácora los residuos peligrosos que entran o salen del almacén.
3	Obligatorio	Utilizar el número de registro en los trámites subsecuentes.	Atendido.
4	Obligatorio	Notificar, con la debida anticipación, cualquier cambio, modificación o alteración, a fin de actualizar el registro.	Enterado.
5	Obligatorio	Dotar de equipos de seguridad y capacitar periódicamente al personal para que dé respuesta a contingencias internas.	Atendidos por el área de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo.
6	Obligatorio	Implementar planes de medidas y acciones para controlar contingencias por fugas, derrames e incendios.	

Tabla 5: Registro como empresa generadora de residuos peligrosos, condicionantes y estado de cumplimiento

Aguas Nacionales y Derechos

La CNA otorga en abril de 2001 el Título de Concesión No. 10PUE100307/18FMGC01, para explotar, usar o aprovechar Aguas Nacionales del Subsuelo por un volumen de 6 473 649,00 m³/año, a través de 25 pozos geotérmicos. La asignación se restringe a la observancia de quince condiciones generales contenidas en el título y ocho establecidas en cada anexo, uno por cada pozo. Así mismo, la CNA había otorgado en 1998 el permiso para descargar 10,00 m³/día de aguas residuales de servicios a un pozo de absorción por un plazo de diez años, contados a partir de la fecha del permiso, que depende del cumplimiento de catorce condiciones generales contenidas en el Título y nueve específicas ordenadas en el anexo. La inscripción, en primera inmatriculación, de estos documentos se efectuó en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la CNA en 2001 y en 1999, respectivamente.

Síntesis

A manera de recapitulación, las actividades que se relacionan con el cumplimiento de las condicionantes ambientales derivadas de las autorizaciones, permisos o licencias descritas, se han clasificado en dos grupos:

- Las relativas a la elaboración de informes que se requieren reportar a la autoridad (Tabla 6)

- Las referentes al seguimiento de programas (Tabla 7).

A excepción de los relacionados con la materia de impacto ambiental, la elaboración de los reportes se efectúa en los formatos establecidos por la autoridad competente, de ahí que la información presentada en los apartados siguientes se limite a este tema.

MATERIA	PERIODICIDAD	REPORTE
Impacto Ambiental	Anual	Programa de Restauración y Conservación de Suelos.
	Anual	Programa de Análisis Continuo Ambiental (Monitoreo de aire y agua).
Prevención y Control de la Contaminación a la Atmósfera	Anual	Cédula de Operación Anual.
	Anual	Inventario de Emisiones.
Residuos Peligrosos	Semestral	Manejo de residuos peligrosos acompañado de sus respectivos manifiestos de entrega, transporte y recepción.
Aguas Nacionales	Trimestral	Información sobre el volumen de aguas nacionales explotadas, usadas o aprovechadas.

Tabla 6. Informes que se requieren realizar y periodicidad con la que se deben reportar

MATERIA	PERIODICIDAD	INFORME
Impacto Ambiental	Anual	Programa de Medición de Ruido
	Anual	Programa Permanente de Mantenimiento de Caminos de Acceso.

Tabla 7. Informes que deben realizarse sin necesidad de reportar

3. Medidas de Prevención o Mitigación de Impactos Ambientales

Las actividades que se desarrollan en el campo relacionadas con esta materia forman parte de las medidas de prevención y mitigación propuestas o manifestadas en la MIA-G y ratificadas, como condicionantes, en la Resolución No. 448, ya mencionada.

Por tanto, siendo la MIA-G el origen de las medidas, conviene iniciar esta segunda parte describiendo el propio manifiesto. La MIA-G, se elaboró de acuerdo con el instructivo de la entonces SEDUE (1989b) y se conformó de 8 capítulos, 17 subcapítulos, 65 incisos y 4 anexos.

El Capítulo VI, Identificación de Impactos Ambientales, describe y fundamenta la Matriz de Impacto Ambiental (Leopold, 1971), constituida por 36 acciones que se desarrollan durante las diferentes etapas del proyecto (columnas) y 59 componentes del ambiente (filas).

Para la evaluación de impactos se asignaron ocho categorías en un abanico de posibilidades que va desde la inexistencia del efecto adverso hasta su existencia de manera significativa y con la medida de mitigación detectada. Así, se identificaron a los componentes relacionados con la emisión del ruido, los desechos líquidos y gaseosos y, en menor medida, las afectaciones sobre flora y fauna, como los que reciben los impactos ambientales más significativos en la mayor parte de las actividades del proyecto.

Por tanto, las medidas de prevención y mitigación de los impactos ambientales identificados (Capítulo VII) fueron las siguientes:

- Contar con equipos de monitoreo de H₂S, para evaluar la dispersión natural de este gas en el aire.
- Reducir el nivel de ruido y eliminar el arrastre de humedad con el uso de silenciadores modificados.
- Conectar las descargas de las purgas de las unidades de generación y del agua separada de los pozos al sistema de inyección.
- Clasificar los residuos sólidos y disponerlos en los sitios permitidos por la autoridad municipal.
- Una vez concluida la construcción, se recuperarían, con obras de restauración, las áreas afectadas.
- Llevar a cabo análisis periódicos de suelos, vegetación y cuerpos de agua superficiales cercanos al área del proyecto.

MEDIDA / IMPACTO AL QUE SE DIRIGE	TIPO DE TÉCNICA	OBJETIVO
Programa de restauración / vegetación	Marco real y tres bolillo (Pastrana-Melchor, 1990)	Revegetar con plantas nativas, tanto arbóreas como arbustivas y herbáceas, producidas en el vivero de CFE, los sitios afectados por el desarrollo del proyecto y aquellos naturalmente desprovistos de vegetación, logrando inducir la sucesión vegetal.
Programa de conservación de suelos / suelos / erosión	Pastización. Siembra de semilla de pasto al voleo y colocación de pasto en rollo. Construcción de cuadrículas de madera y colocación de geomallas, ancladas en la superficie del suelo (Pastrana-Melchor, 1990).	Establecer una cubierta vegetal e inducir la propagación natural de especies nativas en taludes de pendiente elevada y en torno a las presas de enfriamiento y plataformas. Prevenir la erosión de taludes en orillas de caminos y plataformas.
Programa de análisis continuo ambiental (Monitoreo de aire y agua) / emisiones de H ₂ S y contaminación a cuerpos de agua	Análisis topográfico y observación directa. Adsorción química del ácido sulfhídrico, H ₂ S, en el sensor del equipo de medición. Medición directa de parámetros meteorológicos. Análisis estadístico.	Determinación del área de influencia por la descarga de gases. Medición de la concentración de H ₂ S en el aire, a nivel de terreno, y de parámetros meteorológicos. Determinación de los valores promedio. Estimación de la calidad del aire en cuanto a la concentración de H ₂ S.
	Muestreo (CFE,1995d). Análisis químico cualitativo y cuantitativo por medición directa, determinación potenciométrica, titulación a la fenoltaleina, método Argentométrico, absorción atómica de flama y método turbidimétrico. (CFE,1995c). Análisis geoquímico.	Muestreo y análisis fisicoquímico de las aguas de los aprovechamientos y manantiales que tienen relación con el sistema geotérmico. Caracterización fisicoquímica y geoquímica de las aguas. Estimación de la evolución química e influencia de las aguas reinyectadas.
Medición de ruido/ ruido	Norma Oficial Mexicana NOM-081-ECOL-1994	Establecer límites máximos permisibles de emisión de ruido de fuentes fijas y su método de medición.
Programa de conservación de flora y fauna / flora y fauna	Colecta de flora y observación directa. Consulta bibliográfica y con especialistas. Revisión de herbarios. Métodos tradicionales de identificación de fauna. Colectas de fauna.	Controlar, manejar y conservar la flora y fauna silvestres con algún estatus de conservación de acuerdo con la NOM-059-ECOL-2001.
Muestreo y caracterización de suelos y tejido foliar / suelo / erosión	Transectos, para diagnóstico de 0 a 30 cm. Cuadrantes para caracterizar mediante perfiles edafológicos. Toma de tejido foliar (Pastrana-Melchor y Casimiro-Espinosa, 1993). Análisis químico cualitativo y cuantitativo: colorimétrico, gravimétrico y absorción atómica.	Tomar muestras representativas. Determinar las concentraciones de los elementos contenidos en el suelo y el tejido foliar. Conocer el posible grado de perturbación causado por el desarrollo del proyecto.

Tabla 8. Medidas de prevención y mitigación de impactos ambientales

El impacto al que se dirige y el objetivo de la medida, así como las técnicas utilizadas en el desarrollo de las actividades relacionadas con el seguimiento de las mismas, se observa en la Tabla 8. Los resultados obtenidos se describen en los apartados subsecuentes.

Programa de Restauración y Conservación de Suelos (Reforestación)

Como resultado de los métodos vegetativos implantados se ha conseguido la rehabilitación de las áreas afectadas en las que ya se han establecido de manera natural varias especies de plantas, principalmente de vegetación secundaria. Los datos y resultados obtenidos del desarrollo del programa de reforestación desde 1989, es decir cuatro años antes de presentarse la MIA-G a la autoridad, son los siguientes.

Mediante la reforestación se plantan anualmente decenas de miles de árboles, y se ha alcanzado un porcentaje de sobrevivencia promedio de 60% y un máximo de 81% en 1996, hecho sin precedente en esta materia. Hasta 2002 se habían plantado 585 666 árboles en una superficie de 332,21 ha (CFE, 1996a, 2002). Asimismo, se han obtenido beneficios cualitativos adicionales como: a) adaptación y compatibilidad de los árboles reforestados, b) conservación y mantenimiento de la vegetación nativa, c) proliferación de la germinación natural de especies forestales, d) retención de hojarasca y materia orgánica, adecuada para la formación natural de suelo, e) la sucesión vegetal en áreas afectadas se ha acelerado, f) la cobertura vegetal ha disminuido la erosividad del suelo, y g) establecimiento de vegetación secundaria.

Programa de Restauración y Conservación de Suelos (Pastización)

De manera similar a la reforestación, hasta el año 2002 se habían restaurado por medio de esta técnica alrededor de 9,5 ha. Los frutos adicionales logrados han sido: a) inducción a la regeneración natural del bosque y sucesión vegetal de especies nativas en las áreas pastizadas, b) disminución de la erosión en caminos y taludes de plataformas, c) estabilización de cauces prematuros, d) reducción del acarreo de sedimentos hacia las partes bajas (erosión hídrica), e) incremento de la infiltración del agua de lluvia y de la humedad en el subsuelo, útil para el sustento vegetal, f) reducción del efecto visual negativo en cortes de caminos y plataformas de pozos geotérmicos, y g) creación de ambientes propicios para algunas especies de flora y fauna silvestres.

Programa de Análisis Continuo Ambiental (Monitoreo de Aire)

En el campo geotérmico de Los Humeros se desfogan hacia la atmósfera, junto con el vapor, gases incondensables a través de siete fuentes fijas correspondientes a las unidades de generación. Cinco de estas se ubican, considerando como referencia el poblado Los Humeros, dentro de un ángulo de 70° (azimut 325° y 35°) y los dos restantes se localizan dentro de un ángulo de 5° (azimut 140° y 145°). El H₂S representa el 8% de los gases emitidos, y es acarreado por las corrientes de aire presentes en el ambiente, ocasionando que la concentración dentro de la zona de influencia del proyecto sea menor a medida que se encuentra más distante de la fuente de emisión.

Aún cuando las concentraciones de H₂S en el aire ambiente registradas dentro del área de influencia son bajas como para causar problemas de salud, su fuerte y desagradable olor, propio de un ambiente geotérmico natural, obliga a medirlo continuamente. En virtud de ello y de acuerdo con el Término 3.12 de la Resolución No. 448, se marcó el área de influencia en cada una de las descargas con un radio vector de 2,5 km en un barrido de 360° y se formó un cuadrilátero con un área total de 50 km². Con el apoyo de la carta topográfica del campo, de fisiogramas (CFE, 1995a) y visualizando en maqueta la posible trayectoria de cada una de las plumas de vapor, al incidir sobre ellas vientos provenientes de diferentes puntos cardinales, se determinaron las áreas con mayor frecuencia de ocurrencia.

De este análisis se determinaron cuatro zonas con mayor probabilidad de monitorear la concentración del H_2S en el aire ambiente que fluye del campo hacia el área de influencia, durante todo el año. En una pequeña área de cada una de estas zonas se instalaron los equipos de medición continua de la concentración de H_2S en el aire, así como de parámetros meteorológicos (velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente, presión barométrica, humedad relativa y precipitación pluvial).

Semanalmente, los equipos que están diseñados para operar automáticamente, se programan para realizar una medición cada 15 minutos durante las 24 horas del día y se les extrae la información almacenada.



El programa para procesar los datos de H_2S y de meteorología fue desarrollado ex profeso para esta actividad por Magaña-Echeverría (2000), y calcula la temperatura de bulbo húmedo y los valores promedio de cada uno de los parámetros referidos, presentando los resultados en tablas y gráficos. Las tablas y gráficos de los valores de la concentración promedio horaria y diaria, así como de la velocidad del viento se anexan al informe de cumplimiento de condicionantes (Término 3.13).

De acuerdo con los límites sugeridos para las concentraciones promedio horaria y diaria de H_2S en el aire ambiente en campos geotérmicos, de 0,05 ppm y 0,005 ppm, respectivamente (Rolfe, 1989), se estima que mientras el porcentaje anual de los valores que son ligeramente superiores a estos es mayor a uno pero menor a 5, los porcentajes de los datos que superan en uno y dos órdenes de magnitud son menores a la unidad (CFE, 1996a, 2001).

Los valores mayores en un orden de magnitud al base se localizan en el rango aproximado del umbral del olor (0,005 - 0,2 ppm) (CARB, 1985) y los que son mayores a dos órdenes corresponden al umbral del olor detectable, sin ser un olor desagradable (3 - 5 ppm) (EPA, 1978).

Programa de Análisis Continuo Ambiental (Monitoreo de Agua)

El agua separada de la mezcla agua-vapor que fluye del subsuelo a la superficie a través de los pozos productores, junto con el vapor que se condensa en el trayecto del pozo a la unidad de generación así como en la turbina, se inyectan al yacimiento a una profundidad entre 1546 y 2000 m (CFE, 1996b).

Con objeto de identificar cualquier cambio en la composición química de los aprovechamientos de agua subterránea, que pudiera ser consecuencia de la explotación del recurso y/o de la inyección de agua al yacimiento, desde el año de 1987, es decir cinco años antes de presentar la MIA-G, se han venido tomando

muestras de agua cada seis meses, de alrededor de 45 cuerpos (manantiales, norias, etc.) que se encuentran en un radio de 20 a 25 km del campo.

A cada una de las muestras se le determina: el potencial de hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica, la alcalinidad total y la concentración de aniones y cationes que contiene el agua geotérmica como son: boro (B), bicarbonatos (HCO_3), sílice (SiO_2), sulfatos (SO_4), sodio (Na), potasio (K), litio (Li), rubidio (Rb), cesio (Cs), calcio (Ca), magnesio (Mg) y arsénico (As).

La base de datos de las concentraciones de iones en el agua de los manantiales muestreados, se va actualizando anualmente y se elaboran dos tipos de gráficos por manantial: en uno se muestra la concentración de los elementos minoritarios (cloruros, sodio, calcio y potasio) desde 1987 hasta la fecha y, en otro se visualiza la concentración de los elementos mayoritarios (bicarbonatos y sílice).

El análisis geoquímico y la determinación de la ubicación y origen de las aguas (periféricas, equilibradas, volcánicas o calentadas por vapor), se realiza mediante los diagramas triangulares de Piper.

A partir de los análisis químicos (variación de la concentración de iones y aniones respecto al tiempo y la ausencia de elementos propios del fluido geotérmico: B, As y Li) y geoquímicos, se ha comprobado que no existe la menor contaminación de las aguas inyectadas, sino que las aguas muestreadas son de origen meteórico que han tenido interacción con rocas de tipo volcánico a bajas temperaturas.

Medición de Niveles de Ruido

Anualmente, a partir de 1995 se miden niveles de ruido de acuerdo al procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-081-ECOL-1994, en el perímetro de cada una de las siete unidades de generación. En cada uno de los cinco puntos de cada una de las zonas críticas se efectúan 21 mediciones del nivel de ruido. Por lo tanto, considerando tres zonas críticas se realizan 525 mediciones de nivel de ruido tanto de fondo como el emitido por la fuente fija.

La determinación del “Nivel de Fuente Fija Corregido por Ruido de Fondo” para cada unidad, que es el objetivo del procedimiento, se obtiene del nivel equivalente de ruido emitido por la fuente fija y del nivel equivalente de ruido de fondo. El “Nivel de Fuente Fija Corregido por Ruido de Fondo” calculado, se compara con los límites máximos permitidos de la norma, que son 68 dB(a) en el día y 65 dB(a) en la noche para zonas urbanas (ya que para las rurales no se ha establecido límites). De resultar superior, se emiten las recomendaciones pertinentes, como pueden ser: corrección del diseño de silenciadores, modificación de las entradas del vapor a los separadores, cambio de aislantes y mantenimiento de silenciadores.

Con las tablas que contienen las mediciones registradas en campo, así como las generadas de los cálculos, las figuras que muestran las zonas críticas identificadas en cada una de las unidades de generación y las recomendaciones, se elabora el reporte anual (Tabla 7).

Prácticamente, en los ocho años que se ha monitoreado el nivel de ruido ambiental (en el perímetro de la plataforma de la unidad de generación) se han obtenido valores por debajo de los límites permitidos. En los casos específicos en que se han determinado niveles de 1 a 5 dB(a) superiores, se han corregido las causas atendiendo las recomendaciones reportadas. Por tanto, se ha venido cumpliendo con el Término 3.9 de la Resolución No. 448, que determina que se deberán respetar el límite permisible de emisión de ruido de 68 dB(a) durante las diferentes etapas del proyecto (Tovar-Aguado, 2000, 2001).

Diseño de Silenciadores

Al principio del desarrollo del campo se contaba con silenciadores cuyos niveles de emisión de ruido a un metro de la fuente estaban entre 100 y 130 dB(a). Después de un intenso trabajo de investigación y experimentación se logró en 1991 reducir estos niveles de 60 a 85 dB(A), dependiendo del tipo de silenciador y de las características del flujo (Mendoza-Rangel, 1994).

El diseño más eficiente de los silenciadores no sólo reduce el nivel de ruido sino también evita el arrastre de humedad y sales contenidas en el vapor geotérmico.

Programa de Conservación de Flora y Fauna

A partir de las observaciones directas y colectas de fauna realizadas en el campo, se obtuvo el listado florístico que consta de 132 especies, pertenecientes a 51 familias de las cuales las más representativas son: *gramineae*, *leguminosae*, *pinaceae*, *fagaceae*, *cupressaceae* y *compositae*.

Durante los recorridos de campo se detectaron afectaciones o cambios en las asociaciones vegetales, principalmente en el bosque de pino por la presencia de incendios y la tala o aprovechamiento forestal sin control. Asimismo se observaron alteraciones en el ambiente, tanto en sus componentes físicos como biológicos, originados principalmente por el establecimiento de poblaciones (Los Humeros y Maxtaloya), por las actividades productivas de sus pobladores, como la agricultura, la ganadería, el aprovechamiento forestal, además del desarrollo geotérmico en la zona, que de una u otra forma han afectado a la fauna, originando que ésta haya emigrado a zonas menos perturbadas de la región geotérmica.



Actualmente se cuenta también con el listado faunístico del campo, constituido por 122 especies distribuidas en áreas de bosque, malpaís y zacatonal y en las clases siguientes:

- Aves: 67 especies de 23 familias, 4 de estas incluidas en la NOM-059-ECOL-2001, pero ninguna en peligro de extinción.
- Mamíferos: 45 especies de 16 familias, 7 contempladas en la norma y solamente una, *Neotomodon alstoni* (ratón de los volcanes) en peligro de extinción.
- Reptiles: 10 especies de tres familias catalogadas de acuerdo con la norma en especie: rara (R), acertilios listados *Sceloporus grammicus*; endémica y rara (R) *Sceloporus megalepidurus*, *Barisia imbricata* y *Salvadora intermedia*, y endémica y amenazada (A) *Phrynosoma ocbiculare*, *Pituophis deppei* y *Thamnophis scalaris*.

Muestreo y Caracterización de Suelos

El diagnóstico del estado de los suelos en las áreas afectadas por el proyecto geotermoeléctrico, derivado de los muestreos y las determinaciones químicas realizadas en 1990 y posteriormente en 1994 y 1995, es el siguiente.

Los suelos muestreados denotan características físico químicas similares entre 1990 y 1994, lo que significa que durante el periodo estudiado no se presentaron condiciones que alteraran su desarrollo y que el agua de lluvia actuó favorablemente para restablecer las condiciones típicas de la región.

Estos suelos propician el desarrollo forestal por sus características como son:

- La textura, que corresponde a suelos franco-arenosos, lo que representa un valor de infiltración medio con retención de agua y nutrientes en sus primeros horizontes aún cuando la concentración de los iones solubles es baja.
- El contenido de materia orgánica, que los clasifica como suelos de pobres a insignificamente ricos.
- Suelos ligeramente ácidos, pH promedio de 4,8, acidez producto de la acumulación de materia orgánica.

Tejido Foliar

En cuanto al tejido foliar, aun cuando las concentraciones de boro (B), sodio (Na), potasio (K), cloruros (Cl), azufre total (S) y arsénico (As) de las muestras recolectadas en 1995 se incrementaron con respecto a las determinadas un año antes, los valores cayeron en los rangos de tolerancia normales (Chapman, 1966), lo que no representó riesgo alguno para el desarrollo de las plantas, en especial de las coníferas y de las latifoliadas, que son capaces de tolerar grandes concentraciones de iones debido al nivel metabólico y a los mecanismos de resistencia que presentan.

4. Conclusión

De acuerdo con los resultados presentados, se concluye que con las acciones ambientales desarrolladas se han logrado prevenir, mitigar y controlar efectivamente los impactos ambientales producidos por el desarrollo del proyecto geotermoeléctrico de Los Humeros.

Así mismo, se han generado diferentes actividades de protección y conservación ambiental que han contribuido a desarrollar nuevas técnicas que no producen impactos ambientales negativos.

Referencias

- CARB (1985). *The Perception of Hydrogen Sulphide Odor in Relation on Ambient Standard*. California Air Resources Board. CARB Contract A4.046-33. 9 pp.
- CFE (1992). *Manifestación de Impacto Ambiental para la Instalación de Unidades Generadoras de 5 MW de Capacidad en el Campo Geotérmico de Los Humeros, Puebla*. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Subgerencia de Exploración y Desarrollo. Depto. de Protección Ambiental. Diciembre de 1992. 172 pp. Inédito.

- CFE (1994). Respuesta a la Información Adicional del Análisis de la Manifestación de Impacto Ambiental del Proyecto Geotermoeléctrico de Los Humeros, Pue. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Subgerencia de Estudios. Depto. de Protección Ambiental. Febrero de 1994. 24 pp. Inédito.
- CFE (1995a). Respuesta a los Términos de la Resolución No. 448 del INE-SEDESOL, Proyecto Geotérmico de Los Humeros, Pue. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Subgerencia de Estudios. Depto. de Protección Ambiental. Enero de 1995. 73 pp. Inédito.
- CFE (1995b). Programa de Manejo y Rescate de Flora y Fauna Silvestres en el Campo Geotérmico Los Humeros, Pue. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Sugerencia de Estudios. Depto. de Protección Ambiental. 13 pp. Inédito.
- CFE (1995c). Análisis Físicoquímico y Bacteriológico de una Muestra de Agua. Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Proyecto de Especificación Clave 10 100-07. Noviembre de 1995. Revisada por el Departamento de Normalización del LAPEM el 10 de junio de 1996. 28 pp. Inédito.
- CFE (1995d). Toma de Muestras de Agua. Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Proyecto de Especificación Clave 10 100-08. Diciembre de 1995. Revisada por el Departamento de Normalización del LAPEM el 12 de junio de 1996. 12 pp. Inédito.
- CFE (1996a). Informe de Avance de los Programas Establecidos en los Términos de la Resolución No. 448 Emitida para el Proyecto Geotermoeléctrico Los Humeros, Pue. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Sugerencia de Estudios. Depto. de Protección Ambiental. Residencia Los Humeros. Enero de 1996. 39 pp. Inédito.
- CFE (1996b). Resumen Histórico de los Pozos de Los Humeros, Pue. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Sugerencia de Estudios. Depto. de Yacimientos. Informe OIY-HU-09-96. Mayo de 1996. 22 pág. Inédito.
- CFE (2001). Reporte de avance de los términos 3,7 y 3,12 de la resolución No. 448. GPG, Sugerencia de Estudios, Departamento de Protección Ambiental y Residencia Los Humeros. Inédito.
- CFE (2002). Reporte de avance de cumplimiento de condicionantes 3,7 y 3,17 de la Resolución No. 448, correspondiente al 2001. GPG, Sugerencia de Estudios, Departamento de Protección Ambiental y Residencia Los Humeros. Inédito.
- Chapman, H.D. (1966). *Diagnostic Criteria for Plants and Soils*. Department of Soils and Plant Nutrition, University of California, Citrus Research Center and Agricultural Experimental Station, Riverside. Vol. II and III.
- EPA (1978). *Hydrogen Sulfide*. Environmental Protection Agency of United States. EPA-600/1-78-018. February 1978. Environmental Health Effects Research Series, PB 278 576. 272 pp.
- Leopold, L.B. (1971). *A Procedure for Evaluating Environmental Impact*. US Geological Survey, Circular 645.
- Magaña-Echeverría, N. (2000). Sistema PRODAACSULMET. Programa para procesar datos de ácido sulfhídrico y de meteorología. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Subgerencia de Estudios. Departamento de Protección Ambiental. Octubre del 2000. Inédito.

- Mendoza-Rangel, E. (1994). Catálogo de Silenciadores Modificados para Mejorar su Eficiencia. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Depto. de Protección Ambiental. Julio de 1994. 52 pp. Inédito.
- Pastrana-Melchor, E. (1990). Actividades de Restauración y Rehabilitación Ecológica del Campo Geotermoeléctrico Los Humeros. Área de Protección Ambiental. Diciembre de 1990. 34 pp. Inédito.
- Pastrana-Melchor, E. y J.G. Casimiro-Espinoza (1993). Evaluación de Áreas Afectadas en Proyectos Geotermoeléctricos, Mediante el Muestreo de Suelos y Tejido Foliar. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Depto. de Protección Ambiental. Inédito.
- Rolfe, K. A. (1989). Air Pollutants Associated with Geothermal Energy. *II World Congress on Air Quality*. Paris, May 1989. Required Air Pollution Control Officer, Department of Health, Auckland, NZ. 27 pp.
- SEDESOL (1994). Resolución No. 448. Dirección General de Normatividad Ambiental. Instituto de Ecología. Oficio No. A.O.O.DGNA-009404. 3 de octubre de 1994. 8 pág. Inédito.
- SEDUE (1989a). Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos CEOESE004/89, para la selección, exploración y preparación de sitios destinados a la instalación de sistemas geotérmicos, así como para la construcción de los mismos. *Diario Oficial de la Federación*. 7 de Junio de 1989.
- SEDUE (1989b). Instructivo para desarrollar y presentar la Manifestación de Impacto Ambiental en la Modalidad General al que refieren los Artículos 9º. y 10º. del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental. *Gaceta Ecológica*, Vol. I, No. 3. Septiembre de 1989.
- Tovar-Aguado, R. (2000). Medición de ruido realizada en las unidades del campo geotérmico Los Humeros, Pue. Informe No. RM-HU-001/00. Julio de 2000. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Residencia de Estudios. Inédito.
- Tovar-Aguado, R. (2001). Reporte de la medición de ruido en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. 17 de septiembre de 2001. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Residencia de Estudios. Inédito.