

30



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA**

**ASPECTOS PRÁCTICOS DE PRUEBAS DE
TRAZADORES RADIOACTIVOS.
APLICACIÓN CAMPO GIRALDAS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO PETROLERO
PRESENTA:
OCTAVIO VELÁZQUEZ MANJARREZ

DIRECTORA DE TESIS: Dra. Jetzabeth Ramírez Sabag



Cd. Universitaria, México, D.F.
Enero de 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-1505

SR. OCTAVIO VELAZQUEZ MANJARREZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Dra. Jetzabeth Ramírez Sabag y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

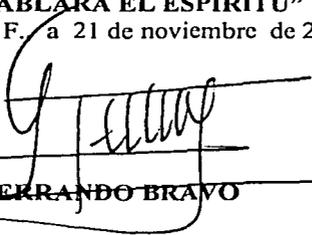
**ASPECTOS PRACTICOS DE PRUEBAS DE TRAZADORES RADIOACTIVOS.
APLICACION CAMPO GIRALDAS**

- I INTRODUCCION**
- II CONCEPTOS RELACIONADOS AL TEMA**
- III USOS Y APLICACIONES DE RADIOTRAZADORES EN LA INDUSTRIA PETROLERA**
- IV TRABAJO DE CAMPO Y ANALISIS DE MUESTRAS**
- V EJEMPLO CAMPO GIRALDAS**
- VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D. F. a 21 de noviembre de 2001
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

P

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE INGENIERÍA.

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA.

ALUMNO: Velázquez Manjarrez Octavio

Nº de Cuenta: 9139529-8

Tema de Tesis: "ASPECTOS PRÁCTICOS DE PRUEBAS DE TRAZADORES
RADIOACTIVOS. APLICACIÓN CAMPO GIRALDAS".

JURADO DE EXAMEN PROFESIONAL

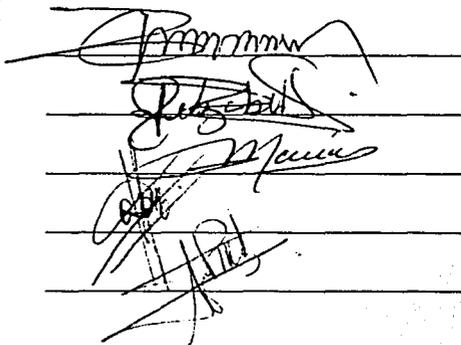
Presidente: Ing. Manuel Villamar Vigueras

Vocal: Dra. Jetzabeth Ramírez Sabag

Secretario: Ing. Salvador Macias Herrera

1er Suplente: Ing. Olivia Bobadilla Mendoza

2do Suplente: M.I. José Martínez Pérez

The image shows five horizontal lines representing a document. On each line, there is a handwritten signature in black ink. The signatures are written in a cursive style and are somewhat overlapping. The first signature is the largest and most prominent, followed by the others in descending order of size and prominence.

Ciudad Universitaria, D.F.
Diciembre de 2001

Agradecimientos

A Dios por haberme considerado digno de recibir la oportunidad de vivir la vida.

A mi Papá Mario (QEPD) por ser la fuerza interna que me impulsó siempre para lograr esta meta. Gracias Pá...Te recuerdo y Te amo!!

A mi Madre por su infinito amor y por el apoyo constante en mi vida, sin tí no hubiera logrado esto. Gracias Má ... también Te amo con todo mi corazón!!!

A mis hermanos Adriana, Luis Mario y Carolina; a mis sobrinos Andrea y Emilio por ser todos un gran apoyo y un estímulo para que yo pudiera lograr esto. Los adoro a todos!!

A mi amada Laus por "aparecer" cuando más te buscaba, gracias por ser un gran estímulo y una de mis ilusiones más grandes en la vida. Te amo cariño mio!!!

A mi familia en general, mis tías Lupita y Silvia, mi tío Pedro, por su apoyo en todo momento.

A en medio por haberme hecho un comunicólogo mientras me formaba como ingeniero. Gracias a todos, a mis primos queridos Cesar, Alex, Ary, Mary, a mis amigos de trabajo y de diversión Alvaro, Gaby, Abiuth, Rubén, Liliانا, Isaac, Jorge, Briza, Arturo y a todos con los que alguna vez trabajé en la agencia.

A la Universidad nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por darme las herramientas para poder ser alguien en la vida. Siempre estaré orgulloso de ser puma universitario!!!

A mis hermanos de la Facultad de Ingeniería, Miguel Ángel Maruri, Miguel A. González, Blanca Arroyo, Edgar Meza, Marcela Torres, Hegel Rey, Yazmín García, a Francisco Castellanos por su apoyo y hospitalidad durante el desarrollo de mi tesis. A todos y cada uno de mis compañeros de clase muchas gracias de verdad!

A mis profesores que siempre me ayudaron cuando los necesité. Gracias.

A Vicky y a Leo que me soportaron durante mi servicio social y que me siguen apoyando hoy en día. Gracias a las dos.

A Maru....nunca he olvidado lo que hiciste por mi amiga, gracias, mil gracias.

Agradecimientos técnicos

A la Doctora Jetzabeth Ramírez Sabag por ser mi guía y apoyo durante la realización de la tesis. Fue toda una aventura trabajar con usted, siempre le agradeceré lo que hizo por mi.

Al Departamento de Tecnología Nuclear del Instituto Mexicano del Petróleo de la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Gracias a las siguientes personas:

Químico. Edison Perez de la Cruz
Ingeniero. Guillermo Falconi de la Fuente
Ingeniero. Julián Cruz Gómez
Ingeniero. Mario Esquivel Reyes
Químico. Justo Hernández Del Real
Ingeniero. Jorge Vega Barrita
Ingeniero. Alejandro Mendóza Pérez
Ingeniero. Rubicel Gordillo Hernández
Ingeniero. Guadalupe Santos Sarabia
Técnico. Gerardo Barra Opon
Técnico. Miguel Ángel Salinas Chávez
Técnico. Rene Martín Lara Amaya
Técnico. Julio Hernández Jiménez
Técnico. José Luis Limbert Hernández
Técnico. Jesús Manuel Martínez Palma

Gracias a todos, siempre fueron un gran apoyo.

A la Maestra Rosa Elva Huitrón por su apoyo en la revisión de mi trabajo de tesis.

TEMA DE TESIS:
ASPECTOS PRACTICOS DE PRUEBAS DE TRAZADORES
RADIOACTIVOS. APLICACIÓN CAMPO GIRALDAS

TEMARIO	Página
CAPÍTULO 1. Introducción	1
CAPÍTULO 2. Conceptos relacionados al tema	8
2.1 Radioactividad y estructura atómica. Definiciones básicas	8
2.2 Clasificación de radioisótopos	11
2.3 Radiación artificial y radiación natural	13
2.4 Tipos de desintegraciones radioactivas	15
2.5 Interacción de las radiaciones	
Alfa, Beta, Gamma y neutrones con la materia	19
2.6 Actividad radioactiva	21
2.7 Vida media y vida promedio	24
2.8 Definición de trazador y de trazador radioactivo	26
2.9 Radioisótopos empleados en la industria petrolera	27
2.10 Modelos matemáticos	29
2.10.1 Modelo de Brigham	31
2.10.2 Modelo de Jensen y Home	32
2.10.3 Modelo de Ramírez y Cols.	33
CAPÍTULO 3. Usos y aplicaciones de radiotrazadores en la industria petrolera	35
3.1 Perforación y terminación de pozos	36
3.2 Pérdidas de circulación	37
3.3 Tubería	38
3.4 Producción	39
3.5 Localización de obstrucciones en ductos	41
3.6 Medición de fluidos	43
3.7 Identificación de líneas	45
3.8 Usos de trazadores radioactivos en otras áreas de la ingeniería petrolera	46
3.9 Pruebas de pozo a pozo	47

CAPÍTULO 4. Trabajo de campo y análisis de muestras	50
4.1 Componentes importantes de la prueba de trazadores radioactivos	54
4.1.1 Pozo inyector	54
4.1.2 Pozos de monitoreo	54
4.1.3 Selección, volúmenes y concentraciones de trazador	55
4.1.4 Muestreo y análisis en el campo	58
4.1.5 Equipos de detección y medición de radioactividad	59
4.1.5.1 Detector de centelleo líquido	60
4.2 Metodología empleada por el Departamento de Tecnología Nuclear del IMP para el diseño de una prueba de trazadores radioactivos	62
4.2.1 Información general de Campo	62
4.2.2 Evaluación y selección del trazador	63
4.2.3 Selección de los pozos	64
4.2.4 Inyección con fluido de agua	65
4.2.5 Inyección con fluido de aceite	67
4.2.6 Campos con inyección de trazadores gaseosos (aceite/gas)	71
CAPÍTULO 5. Ejemplo Campo Giraldas	72
5.1 Secuencia de una prueba de inyección de trazadores	72
5.2 Arribo al pozo Giraldas-74	79
5.3 Muestreo	87
5.4 Preparación de muestras en laboratorio de "campo"	89
5.5 Análisis de muestras con equipo de centelleo líquido	90
5.6 Resultados preliminares	99
CAPÍTULO 6. Conclusiones y recomendaciones	108
• Glosario	111
• Nomenclatura	124
• Bibliografía	125
• Apéndice A	127
APÉNDICE A. Normatividad y Seguridad en el manejo de material radioactivo	127

Relación de Tablas y Figuras

Tablas	Página
Tabla 2.1 Tabla Periódica de los elementos	12
Tabla 2.2 Radioisótopos empleados en la industria petrolera. Emisores Beta.	28
Tabla 2.3 Radioisótopos empleados en la industria petrolera. Emisores Gamma	28
Tabla 5.1. Datos del pozo Girdaldas-12	102
Tabla A.1 Normas Oficiales Mexicanas en materia de Protección Radiológica y Seguridad Nuclear	137
Figuras	
Fig. 2.1 Tipos de Radiación	18
Fig. 2.2 Emisión de energía Gamma	20
Fig. 3.1 Registro de calidad de cementación en tuberías	37
Fig. 3.2 Análisis de estados físicos de tuberías	39
Fig. 3.3 Registro de calidad de estimulación y fracturamiento	40
Fig. 3.4 Localización de "diablos" perdidos	43
Fig. 3.5 Identificación de líneas a distancia	45
Fig. 3.6 Pruebas de radiotrazado de pozo a pozo	48
Fig. 5.1 Plano de localización del Campo Girdaldas	74
Fig. 5.2 Equipo de seguridad empleado durante la inyección de trazadores radioactivos	79
Fig. 5.3 Vial contenedor para la dilución e inyección del trazador	81
Fig. 5.4 Levantamiento inicial de niveles de radiación	81
Fig. 5.5 Desempacamiento y preparación y del trazador radioactivo	82
Fig. 5.6 Dilución del trazador en vial contenedor para inyección	83
Fig. 5.7 Dosificación del trazador	83
Fig. 5.8 Monitoreo del radiotrazador en la línea de inyección	84
Fig. 5.9 Aplicación de solución descontaminadora	85

	Página
Fig. 5.10 Medición de radiación al termino de la inyección	85
Fig. 5.11 Recolección de desechos radioactivos	86
Fig. 5.12 Preparación para tomar la muestra en el pozo Giraldas-72	88
Fig. 5.13 Recolección de la muestra del pozo giraldas-12	88
Fig. 5.14 Muestras provenientes de laboratorio de campo	90
Fig. 5.15 Colocación de guantes protectores	91
Fig. 5.16 Acondicionamiento del lugar de trabajo para preparación de muestras	91
Fig. 5.17 Viales para conteo de polietileno	92
Fig. 5.18 Viales para conteo de vidrio	92
Fig. 5.19 Viales de Copper-teflón	93
Fig. 5.20 Preparación de la muestra en viales para conteo	93
Fig. 5.21 Colocación de "Hi-Safe" a la muestra	94
Fig. 5.22 Transporte de muestras a equipo de conteo	95
Fig. 5.23 Wallac 1410	95
Fig. 5.24 Pantalla de inicio de software del Wallac 1410	96
Fig. 5.25 Quantulus 1220	96
Fig. 5.26 Desplegado del conteo del Quantulus 1220	96
Fig. 5.27 Espectro del equipo Wallac 1410 del conteo de muestras	97
Fig. 5.28 Espectro de conteo del equipo Quantulus 1220	98
Fig. 5.29. Curva de Conteos por minuto de las muestras del pozo Giraldas-12	101
Fig. 5.30 Curva de desintegraciones por minuto de las muestras del pozo Giraldas-12	101
Fig. 5.31. Trazador recuperado por día	104
Fig. 5.32 Grafica de Trazador recuperado acumulado por día	105
Fig. 5.33 Grafica de Agua producida y de Concentración de trazador Tritio Pozo Giraldas-12	106
Fig. A.1 Formato de autorización de almacenamiento temporal de material radioactivo	135
Fig. A.2 Formato de autorización de almacenamiento temporal de material radioactivo	136

Resumen

Hoy día, la industria petrolera nacional enfrenta nuevos retos y por lo mismo requiere de herramientas que le permitan enfrentarlos. La mayoría de los yacimientos en México son fracturados; además se encuentran en una segunda etapa de explotación en la que se emplean procesos de recuperación secundaria y/o mejorada. Para este tipo de procesos se requiere conocer las heterogeneidades del yacimiento, pues el hecho de no detectarlos a tiempo, y más aún de no considerarlos en el diseño de los proyectos de inyección de fluidos, puede provocar resultados desfavorables e incluso el posible fracaso del proyecto en cuestión. Las pruebas de trazadores radioactivos de pozo a pozo, constituyen una herramienta valiosa para la detección de estas heterogeneidades por lo que se recomienda realizar un estudio de trazadores antes de cualquier proyecto de recuperación con el objeto de estimar el comportamiento de los fluidos de inyección. De aquí, la importancia que últimamente ha adquirido esta herramienta.

El objetivo de este trabajo es presentar la herramienta de manera general, se muestran los aspectos prácticos de este tipo de pruebas. Se mencionan brevemente conceptos relacionados con el tema, las aplicaciones de los radiotrazadores en la industria petrolera enfocados principalmente a las pruebas de pozo a pozo; así como el trabajo de campo y análisis de muestras requerido por un estudio de radiotrazado. Finalmente muestra un ejemplo real de aplicación en el Campo Giraldas. También se incluye un glosario de términos al respecto así como un apéndice que trata la normatividad y Seguridad en el manejo de material radioactivo.

En resumen, este trabajo ilustra la parte práctica de las pruebas de trazadores radioactivos con la intención de dar a conocer la forma de trabajo, los aspectos operativos y los elementos que intervienen e integran una prueba de trazadores radioactivos.

CAPÍTULO 1

Introducción

La ingeniería petrolera se ha preocupado a lo largo de su historia, en uno de los puntos más importantes para su desarrollo efectivo, como lo son los yacimientos petroleros y los yacimientos con acumulaciones de gas. El uso de varias herramientas y técnicas para su caracterización ha sido objeto de estudio y desarrollo constante, y prueba de ello es la existencia de las pruebas de presión, de la aplicación de registros geofísicos, de pruebas de interferencia, de resonancia magnética, etc., por mencionar algunos ejemplos.

Hoy en día, el estado actual de la mayoría de los campos en el mundo, se encuentran en una etapa de yacimientos maduros, esto es, que la producción primaria de hidrocarburos está llegando a una etapa donde será necesario la adición de energía ya sea al pozo o la adición de energía al propio yacimiento para su explotación. Esto se logra con la aplicación de proyectos de recuperación secundaria o mejorada, particularmente y uno de los más empleados es la inyección de agua.

Conocer el yacimiento es fundamental para su explotación, de manera óptima; dadas las circunstancias antes descritas, es imperativo la creación y aplicación de herramientas que permitan la caracterización de nuestros yacimientos, y aquí es donde podemos hacer uso de una de las herramientas más importantes para el conocimiento del comportamiento de un yacimiento.

La herramienta de la que hablamos es la aplicación de pruebas de trazadores radioactivos. Esta herramienta proporciona información muy valiosa, que complementa de manera importante estudios de yacimientos realizados con técnicas normalmente empleadas en la industria petrolera.

El análisis de una prueba de trazadores requiere de una metodología que considere los siguientes puntos:

- Diseño de la prueba de trazadores donde se especifique la selección del trazador, la identificación de pozos inyectoros y de recolección, programa de muestreo, y el monitoreo de la respuesta del trazador
- Modelo matemático que represente todos los procesos que puedan ocurrir cuando el trazador se mueva a través del medio poroso fracturado
- Trabajo de campo y análisis de campo
- Métodos de optimización que proporcionen el mejor ajuste a los datos de la prueba del trazador
- Interpretación de la prueba determinando cuantitativamente algunos de los parámetros que influyen en el movimiento de los fluidos del yacimiento

El análisis cuantitativo de una prueba de trazadores, depende de la habilidad para describir todos los procesos que contribuyen en el flujo del trazador del yacimiento.

El empleo de trazadores radioactivos en estudios geofísicos se inició aproximadamente, en el año 1939 en los Estados Unidos de América. Los primeros trabajos con materiales radioactivos, se planearon con el fin de estudiar la distribución del cemento en los pozos petroleros para evaluar la eficiencia de las operaciones de cementación.

La aplicación de los radioisótopos en Petróleos Mexicanos, se inicio aproximadamente en el año 1950 y desde entonces se utilizan en todas las áreas de la industria petrolera nacional.

La prueba de trazadores radioactivos consiste en la incorporación de una o más sustancias radioactivas a un tipo de fluido, que será inyectado a través de un pozo acondicionado para dicho fin; y además se tendrán seleccionados previamente cierto número de pozos productores que se desempeñarán como pozos de monitoreo.

Como se entenderá, el diseño de la prueba es muy importante para asegurar el éxito de la prueba misma. Los estudios previos que se requieren para diseñar una prueba son diversos, como por ejemplo: un estudio de la litología del yacimiento, el estudio del fluido a inyectar y el fluido que tenemos dentro del yacimiento; apoyarnos en una prueba de presión para conocer algunos parámetros como la permeabilidad.

El apoyo y el trabajo multidisciplinario es muy importante también para lograr los objetivos, desde el uso de equipos de cómputo hasta el empleo de técnicos especializados en materia de seguridad radiológica, que como se mostrará más adelante, son personas que continuamente se capacitan y actualizan en el uso y manejo de material radiactivo.

En este trabajo se presentan los aspectos prácticos, las bases y principios elementales del diseño y aplicación de la técnica de trazadores radioactivos. El empleo de esta técnica es muy amplia, ya que considera varios tipos de pruebas dependiendo si es para un sólo pozo o si es una prueba entre varios pozos, además varía en la parte del tipo de trazador que será empleado, ya sea un trazador radioactivo o un trazador químico, un óptico, un fluorescente, uno de gas o de cualquier otro tipo.

Los trazadores radioactivos son sustancias que se agregan al fluido inyectado y que se utilizan para conocer la trayectoria seguida por los fluidos, a medida que avanzan hacia los pozos productores dentro de un yacimiento. Un trazador debe reunir ciertas características, entre otras: no interferir con el flujo de los fluidos, satisfacer los requerimientos con bajas concentraciones y además ser de fácil detección.

Otro propósito al introducir trazadores en el fluido inyectado es detectar la presencia de heterogeneidades o discontinuidades en los yacimientos. En cualquier proyecto de inyección de fluidos, las líneas de alta permeabilidad en el yacimiento, pueden canalizar rápidamente el fluido inyectado, disminuyendo drásticamente la eficiencia del proceso, llegando incluso a ocasionar su fracaso.

Los principales objetivos en los estudios de diseño y aplicación de trazadores es la caracterización de la dinámica del flujo de los fluidos, que intervienen en los patrones de inyección de agua. Esto sin duda es una parte importante, ya que con la aplicación de pruebas de trazadores podemos contar con un elemento más de juicio para evaluar y determinar cuales podrían ser los futuros proyectos de recuperación mejorada, en especial proyectos de inyección de agua.

Estas técnicas pueden ser de gran utilidad para comprobar las predicciones de los modelos matemáticos, además nos servirán para determinar el tiempo de tránsito de los fluidos entre los pozos de inyección y los pozos productores, para definir sistemas regionales de fracturas y su orientación, para localizar barreras naturales que disminuyen el flujo de los fluidos, además de poder determinar los patrones de flujo.

Por supuesto que es muy importante elegir un trazador apropiado que se identifique totalmente con el fluido de inyección, que no se deposite ni sea absorbido por el medio. Los trazadores se han convertido en una herramienta de estudio para mejorar los procesos de producción, inyección y procesamiento de los fluidos en los campos petroleros.

A los trazadores se les relaciona en otros campos como en la energía geotérmica, en la hidrología y para el almacenamiento de fluidos en el subsuelo, tanto de hidrocarburos como de agua, con esto, se tendrá un mejor entendimiento de las características de dichos depósitos así como las formas de aplicar técnicas de operación para la extracción de los fluidos.

En ingeniería petrolera, el uso de trazadores es una herramienta que se ha aplicado con resultados satisfactorios en todas sus áreas: en el área de perforación y terminación de pozos, en el área de producción, así como para la evaluación de las condiciones de las tuberías, ya sea en las empleadas en la perforación, como en las de producción e incluso en las de transporte de hidrocarburos, sin olvidar al área de yacimientos.

En el capítulo 3 se mencionarán algunos ejemplos de cómo es empleada esta técnica de trazadores, con operaciones básicas y fundamentales en todas y cada una de las áreas de la industria petrolera.

Algunas aplicaciones de trazadores que se emplean en la ingeniería petrolera requieren una detección desde el fondo del pozo, vía un cable de acero, y registrados con instrumentos de medición en la superficie, de este modo se tiene la emisión de rayos Gamma o de rayos Beta, incluso de rayos alfa, que emiten los isótopos radioactivos que son registrados con equipo especial.

En este trabajo mostraremos algunos equipos de medición y detección de radioactividad, y que son los que se encuentran en las instalaciones del Instituto Mexicano del Petróleo, IMP, en la Ciudad de Villahermosa, Tabasco. Dichos equipos fueron empleados para la medición de muestras recuperadas en pozos que actualmente están contenidos dentro de los programas de la inyección de agua adicionando trazadores radioactivos.

Se puede resumir que el uso de los trazadores en la ingeniería petrolera ha contribuido para aclarar muchos procesos complejos, que esta industria presenta día con día. La tecnología del análisis de pruebas de trazadores, ha ido evolucionando considerablemente en los años recientes y se ofrecen nuevos y mejores servicios para aplicar con éxito las pruebas de trazadores en los campos tanto petroleros como en los de la hidrológica y la geotermia.

En cuanto al contenido del presente trabajo, se puede resumir de manera general de la siguiente manera. En el Capítulo 1 se describe brevemente la situación general del uso de trazadores radioactivos en la ingeniería petrolera en México, y se presenta, sólo con fines ilustrativos en qué consiste el trabajo de campo y el análisis de muestras en la aplicación de una prueba de trazadores radioactivos en México.

En el Capítulo 2 se presentan los conceptos más importantes relacionados al tema de una prueba de trazadores radioactivos, se mencionan desde la estructura atómica y componentes del mismo, así como, conceptos referentes a los materiales radioactivos, su vida media, el tipo y cantidad de energía que manejan, hasta los tipos de modelos matemáticos empleados para la descripción del comportamiento de flujo del fluido a través de un medio poroso.

En el Capítulo 3 se describen brevemente las aplicaciones de los elementos radioactivos en la ingeniería petrolera, no sólo con la aplicación de pruebas de radiotrazado entre pozo y pozo, sino en otras aplicaciones del área.

El Capítulo 4, trata propiamente de los aspectos prácticos de una prueba de trazadores radioactivos, la información necesaria para el diseño y aplicación de la prueba. Se mencionarán los trabajos que se realizan en el campo así como también el análisis de las muestras obtenidas de los pozos de monitoreo. Se mostrarán los elementos más importantes a considerar para el desarrollo de una prueba de radiotrazado, como por ejemplo, el pozo inyector, los pozos de monitoreo, los programas de muestreo, así como el equipo empleado en el análisis de las muestras.

En el Capítulo 5, se mostrará la secuencia que se siguió en un ejemplo de aplicación. Dicha prueba se desarrolló en el Campo Giraldas perteneciente al Activo Muspac y es importante resaltar que los datos que se mostrarán son reales obtenidos en dicho Campo. Se ilustra la forma de trabajar en la prueba, con objeto de dar a conocer los aspectos prácticos y los elementos que conforman una prueba de trazadores radioactivos. De esta manera, el lector podrá conocer, los elementos físicos, químicos y radioactivos que intervienen en la aplicación de una prueba de trazadores radioactivos.

En el Capítulo 6, se presentan las conclusiones y recomendaciones, así como un glosario de términos referentes al tema tratado en este trabajo. También se incluye la bibliografía empleada para la realización de este trabajo.

Por último, tenemos un Apéndice A, que se refiere a la Normatividad y Seguridad en el manejo de material radioactivo. La intención es hacer mención de los puntos más importantes en materia de normatividad y legislación radiológica, quiénes son los organismos responsables, la normatividad respecto al tema, así como también los puntos más relevantes en materia de seguridad radiológica.

CAPÍTULO 2

Conceptos relacionados al tema

El objetivo es de tratar de resumir algunos conceptos fundamentales relacionados con el tema de este trabajo, necesarios para un mejor entendimiento de los capítulos posteriores.

También, en este capítulo se presentan algunos de los modelos matemáticos representativos del flujo de trazadores en medios porosos; con el fin de familiarizarse con el uso de éstos y otros modelos existentes que nos permiten el análisis de las pruebas de trazadores.

2.1 Radioactividad y estructura atómica. Definiciones básicas

La radioactividad, es la propiedad en virtud a la cual algunos elementos que se encuentran en la naturaleza, como el Uranio, se transforman, por emisión de partículas Alfa (núcleos de Helio), Beta (electrones), Gamma (fotones), en otros elementos nuevos, que pueden ser o no, a su vez, radiactivos. La radioactividad es por tanto, un fenómeno natural al que el hombre ha estado siempre expuesto, aunque también existen las radiaciones artificiales. Así pues, diferenciamos dos casos; radiación natural y radiación artificial

En Febrero de 1896, el físico francés Henri Becquerel investigando con cuerpos fluorescentes (entre ellos el Sulfato de Uranio y el Potasio), descubrió una nueva propiedad de la materia a la que posteriormente Marie Curie llamó, "Radioactividad". Se descubre que ciertos elementos tenían la propiedad de emitir radiaciones semejantes a los rayos X en forma espontánea. Tal radiación era penetrante y provenía del cristal de Uranio sobre el cual se investigaba.

Marie y Pierre Curie al proseguir los estudios encontraron fuentes de radiación natural, bastante más poderosas que el Uranio original, entre estos el Polonio y el Radio. La radioactividad del elemento no dependía de la naturaleza física o química de los átomos que lo componen, sino que era una propiedad intrínseca de la materia.

A la fecha, se han encontrado alrededor de 340 nucleidos en la naturaleza, de los cuales alrededor de 70 son radiactivos (radioisótopos), principalmente entre los elementos pesados. Todos los elementos que tienen un número atómico, Z, mayor que 80 poseen isótopos radioactivos.

2.1.1 Estructura Atómica

La descripción básica de la estructura atómica indica que el átomo se compone de un núcleo y una envoltura o nube electrónica. El núcleo está compuesto de protones, con carga eléctrica positiva, y por neutrones que no poseen carga eléctrica. A estas partículas con frecuencia se les llaman "Nucleones". La envoltura exterior se compone de electrones que poseen carga eléctrica negativa.

La masa de un protón corresponde a aproximadamente 1840 veces la masa del electrón, ($m_p = 1,67 \times 10^{-27}$ Kg). Sin embargo, el protón y el neutrón poseen prácticamente igual masa. El átomo en su conjunto y sin la presencia de perturbaciones externas es eléctricamente neutro, es decir, existe igual cantidad de protones y de electrones.

2.1.2 Definiciones básicas de la estructura atómica

2.1.2.1 Átomo. Es la menor porción de un elemento la cual no tiene carga eléctrica, y puede entrar en combinaciones químicas.

2.1.2.2 Electrón. Es una partícula elemental con carga eléctrica negativa igual a $1,602 \times 10^{-19}$ coulomb y masa igual a $9,1083 \times 10^{-28}$ g, que se encuentra formando parte de los átomos de todos los elementos.

2.1.2.3 Neutrón. Es una partícula elemental eléctricamente neutra y masa ligeramente superior a la del protón, que se encuentra formando parte de los átomos de todos los elementos.

2.1.2.4 Protón. Es una partícula elemental con carga eléctrica positiva, igual a $1,602 \times 10^{-19}$ coulomb y cuya masa es 1837 veces mayor que la del electrón, que se encuentra formando parte de los átomos de todos los elementos

2.1.2.5 Núcleo. Región central de un átomo donde se encuentra concentrada casi toda la masa del mismo. Está formado por protones y neutrones, a excepción del átomo de hidrógeno en la que su núcleo sólo está formado por 1 protón

2.1.2.6 MOL. El mol es el número de átomos que está contenido en, exactamente, doce gramos de $^{12}\text{C}_6$ puro. Experimentalmente esto es igual a $6.02252 \cdot 10^{23}$ átomos.

2.1.2.7 Fotón. Es una partícula elemental que representa un cantidad discreta de energía electromagnética. El fotón tiene masa en reposo y no tiene carga eléctrica. Hoy día se acepta el hecho de que la luz se compone de fotones que viajan a una velocidad aproximada de 300.000 km/s.

2.1.2.8 Mega Electrón-Volt (Mev). Es una unidad de energía. Se lee como "mega - electrón - volt". 1 MeV equivale a 1.000.000 de eV (electrón - volt). 1 eV es igual a $1,6 \times 10^{-19}$ Joule. Un eV es la energía que experimenta un electrón cuando se encuentra en un campo eléctrico, cuya diferencia de potencial es de 1 volt.

2.1.2.9 Números Atómico y Másico

Un átomo se identifica por la cantidad de partículas presentes en su estructura. Siguiendo una nomenclatura internacional, se designa por una letra "Z" al número de protones que contiene el núcleo atómico, donde Z recibe el nombre de **Número Atómico**. La suma de los protones y neutrones presentes en el núcleo de un átomo, nos da como resultado un número entero que se denomina número másico. Ese número es aproximadamente igual a la masa atómica.

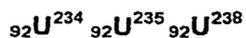
De igual forma, a la cantidad total de protones más neutrones presentes en el núcleo atómico, se le llama **Número Másico** y se designa por la letra "A".

Se comprende que el número de electrones presentes en un átomo se deduce a partir de su número atómico.

Si se designa por "X" a un elemento químico cualquiera, su número atómico y másico se representa mediante la siguiente simbología:



Por ejemplo, para el Uranio tenemos:



2.2 Clasificación de radioisótopos

Conociendo el número atómico y el número másico, los átomos de diversos elementos se pueden clasificar como:

1.- **Isótopos.**- Son átomos que tienen igual número atómico Z y diferente número másico A: ${}_1\text{H}^2$ (deuterio), ${}_1\text{H}^3$ (tritio)

2.3 Radiación artificial y Radiación natural

Al bombardear diversos núcleos atómicos con partículas Alfa de alta energía, estos se pueden transformar en un núcleo atómico de características diferentes, por lo tanto, se transforma en un elemento que no existe en la naturaleza.

Los esposos e investigadores **Irene Curie** y **Frederic Joliot**, experimentando con tales procesos descubren la radioactividad artificial. Ellos se percatan que al bombardear con partículas ciertos núcleos atómicos, estos se vuelven radioactivos.

Si la energía de la partícula es la adecuada, entonces puede penetrar en el núcleo generando su inestabilidad e induciendo su desintegración radioactiva.

La radiación artificial, también proviene de fuentes creadas por el hombre. Los televisores o los aparatos utilizador para hacer radiografías médicas son las fuentes más comunes de las que recibimos radiación artificial. La generada en las centrales nucleares, pertenece a este grupo. El incremento de radiación que recibe una persona en un año como consecuencia del funcionamiento normal de una central nuclear, es de 1 milirem al año (1 **REM** = radiación de rayos Gamma existentes el aire por centímetro cúbico de aire).

La radiación artificial total recibida por el ser humano es del orden del 12% de todas las radiaciones recibidas. Se clasifica de la siguiente manera:

✓ Televisores y aparatos domésticos	:	0.2%
✓ Centrales nucleares	:	0.1%
✓ Radiografías médicas	:	11.7 %

Desde el descubrimiento de los rayos-X y la radioactividad natural a fines del siglo XX (Roentgen, Becquerel, Curie), los efectos y usos de estas radiaciones, en el campo de la biología experimental, medicina, industria, etc., han estado bajo constante estudio.

Como es bien sabido, la radiación de los elementos trae serias consecuencias en los seres vivos, si sobrepasan los límites anuales de radiación normal. La consecuencia más importante es la mutación (en los seres vivos) que afecta a las generaciones tanto presentes, como futuras, y sus efectos irían desde la falta de miembros corporales y malformaciones en fetos, esterilidad incluso, hasta la muerte. Por tanto, es importante que los residuos de las centrales nucleares, que son radioactivos, cumplan con medidas de seguridad, para que no surjan posibles accidentes de fugas de radiación.

2.3.1 Radiación Natural

La radiación natural siempre ha existido, ya que procede de las materias existentes en todo el universo, y puede ser radiación visible (como por ejemplo la luz), o invisible (por ejemplo los rayos ultravioleta). Esta radiación, procede de las radiaciones cósmicas del espacio exterior (Sol y estrellas), pues ellos son gigantescos reactores nucleares, aunque lejanos; también proceden estas radiaciones de los elementos naturales radiactivos (uranio, torio, radio) que existen de forma natural en el aire, agua, alimentos, o el propio cuerpo humano (potasio, carbono-14).

Esta radiación natural, es del orden del 88% de la radiación total recibida por el ser humano, clasificándose de la siguiente manera:

- | | | |
|---|---|------|
| ✓ Radiación cósmica | : | 15 % |
| ✓ Radiación de alimentos, bebidas, etc. | : | 17 % |
| ✓ Radiación de elementos naturales | : | 56% |

2.4 Tipos de desintegraciones radioactivas

Existen tres series de desintegración radioactivas:

1. Serie del Uranio:

Se origina con U-238 y termina con Pb-206 estable.

2. Serie del Torio:

Se origina con Th-232 y termina con Pb-208 estable.

3. Serie del Actinio:

Se origina con U-235 y termina con Pb-207 estable.

La desintegración radioactiva también ocurre cuando existen:

- ✓ Emisión de positrones (definición de positrón)
- ✓ Captura de electrones (captura por el núcleo de un electrón del nivel interno de la nube de electrones)

2.4.1 Desintegraciones Alfa, Beta y Gamma

La radioactividad es un fenómeno que se origina exclusivamente en el núcleo de los átomos radiactivos. La causa que los origina probablemente se debe a la variación en la cantidad de partículas presentes en el núcleo atómico.

Cuando el núcleo atómico es inestable a causa del gran número de protones que posee ($Z = 83$ o superior), la estabilidad es alcanzada con frecuencia, gracias a la emisión de una **Partícula Alfa**, es decir, de un núcleo de Helio (${}^2\text{He}^4$) formado por dos protones y dos neutrones.

Las partículas **Alfa** son átomos de He doblemente ionizados, es decir, que han perdido sus dos electrones. Por tanto, tienen dos neutrones y dos protones. Es la radiación característica de isótopos de número atómico elevado, tales como los del uranio, torio, radio, plutonio.

Dada la elevada masa de estas partículas ya que se emiten a gran velocidad por los núcleos (su velocidad es del orden de 10^7 m/s), al chocar con la materia pierden gradualmente su energía ionizando los átomos y se frenan muy rápidamente, por lo que quedan detenidas con tan sólo unos cm de aire o unas milésimas de mm de agua.

En su interacción con el cuerpo humano no son capaces de atravesar la piel. Así pues, tienen poco poder de penetración siendo absorbidos totalmente por una lámina de aluminio de 0.1 mm de espesor o una simple hoja de papel.

Los emisores Alfa se acostumbran a evitar al máximo su empleo de emisores como trazadores. Es difícil medirlos *in situ* a menos que alguno de sus productos de decaimiento sea emisor Beta o Gamma. La detección directa de emisores Alfa en estudios con trazadores radioactivos es impráctica y además las concentraciones máximas posibles son del orden de microgramos por su alta toxicidad.

Cuando en un núcleo atómico la relación de neutrones/protones es elevada, el núcleo se estabiliza emitiendo un neutrón, una partícula Alfa, o bien como ocurre con mayor frecuencia, emitiendo una **Partícula Beta**, es decir, un electrón.

Las partículas Beta son electrones emitidos a grandes velocidades próximas a la de la luz. Debido a que su masa es menor que la radiación Alfa, tienen más poder de penetración que las partículas Alfa, siendo absorbidas por una lámina de aluminio de 0.5 mm de espesor y quedan frenadas en algunos m de aire, o por 1 cm de agua.

En el cuerpo humano, pueden llegar a traspasar la piel, pero no sobrepasan el tejido subcutáneo. Los positrones son partículas con masa mínima y carga equivalente a la de un protón.

Los emisores Beta ofrecen la ventaja, en relación con los emisores Alfa y Gamma, de la facilidad en su manejo. Por ejemplo el tritio se puede utilizar en cantidades del orden de Curies, sin blindaje, pero sin olvidar que se deben tomar serias medidas precautorias para evitar ingestión o inhalación accidentales así como otras posibles contaminaciones por contacto.

Además los emisores Beta se pueden detectar fácilmente y aun identificar cada uno de ellos de acuerdo con su energía máxima de emisión.

Los **Rayos Gamma** son ondas electromagnéticas de gran energía, muy parecidos a los rayos X. Los rayos Gamma se originan en el núcleo del átomo y por lo general, se presentan cuando ocurre una desintegración de partículas Beta, o bien en una emisión de positrones. Los rayos X tienen su origen en la nube electrónica del átomo.

Los rayos Gamma no poseen carga eléctrica y su naturaleza ondulatoria permite describir su energía en relación a su frecuencia de emisión.

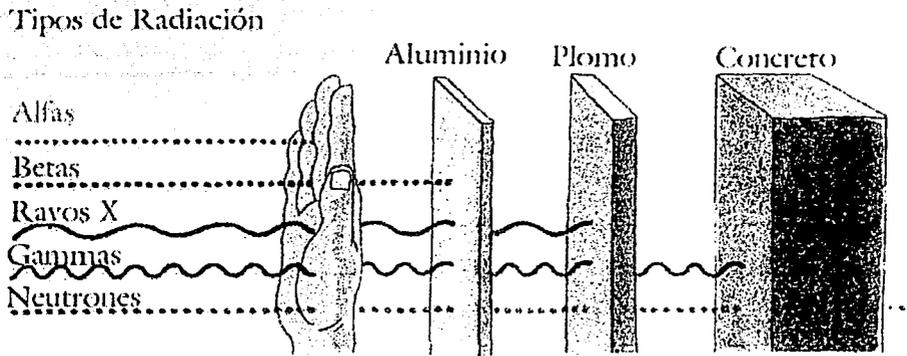


Fig. 2.1 Tipos de Radiación

Las partículas Gamma son radiaciones electromagnéticas de la misma naturaleza que los rayos X pero de menor longitud de onda. Su poder de penetración es muy elevado frente al de las partículas Alfa o Beta, pudiendo atravesar el cuerpo humano. Quedan frenadas con espesores de 1 m de hormigón o unos pocos cm de plomo, por lo que cuando se utilizan fuentes radiactivas que emiten este tipo de radiación, hay que utilizar blindajes adecuados.

Radiación Gamma, γ . Se produce debido al exceso de energía del núcleo pasando a una configuración más estable, emitiendo en este caso un fotón.

La radiación Gamma es la más penetrante, por lo tanto se recomienda su empleo, cuando la distancia mínima entre trazador y detector es muy grande o cuando se interpone algún material (de gran espesor o de número atómico alto) entre trazador y detector.

Los neutrones proceden de reacciones de fisión o de reacciones nucleares con otras partículas. Pueden ser muy penetrantes excepto en agua y en hormigón, y se utilizan para producir elementos radiactivos cuando interactúan con elementos estables.

2.5 Interacción de las Radiaciones Alfa, Beta, Gamma y neutrones con la materia.

2.5.1 Radiaciones Alfa

La partícula Alfa se compone de 2 protones y 2 neutrones. Su poder de penetración en la materia es muy bajo y sólo es capaz de recorrer algunos centímetros en el aire. Su corto recorrido describe una trayectoria prácticamente en línea recta.

Cuando penetra la materia presenta un alto poder de ionización, formando verdaderas columnas de iones (cuando penetra en un centímetro de aire puede producir hasta 30.000 pares de iones).

2.5.2 Radiaciones Beta

La masa de las partículas Beta (electrones negativos) es muy pequeña, por lo tanto, su movilidad es mayor respecto de las partículas Alfa. Durante su recorrido cambia fácilmente de trayectoria y su alcance y poder de penetración es mayor. Además, su poder de ionización es inferior, respecto de la partícula Alfa.

Si una partícula Beta se acerca a un núcleo atómico, desvía su trayectoria y pierde parte de su energía (se frena). La energía que ha perdido se transforma en rayos X. Este proceso recibe el nombre de "Radiación de Frenado".

Otra interesante reacción ocurre cuando una partícula Beta colisiona con un positrón (electrón positivo). En este proceso, ambas partículas se aniquilan y desaparecen, liberando energía en forma de rayos Gamma.

2.5.3 Radiaciones Gamma

Las radiaciones Gamma carecen de carga eléctrica, por lo tanto, no sufren desviaciones en su trayectoria como producto de la acción de campos eléctricos de núcleos atómicos o electrones. Tales características permiten que la radiación Gamma sea capaz de traspasar grandes espesores de material y de ionizar indirectamente las sustancias que encuentra en su recorrido.

Un rayo Gamma es capaz de sacar un electrón de su órbita atómica. El electrón arrancado producirá ionización en nuevos átomos circundantes, lo que volverá a suceder hasta que se agote toda la energía de la radiación Gamma incidente.

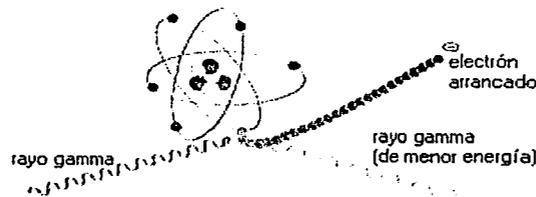


Fig. 2.2 Emisión de energía Gamma.

2.5.4 Interacción de los Neutrones con la Materia.

Los neutrones también carecen de carga eléctrica y no sufren la acción de campos eléctricos ni magnéticos. Al igual que la radiación Gamma son capaces de atravesar grandes espesores de material.

Cuando un neutrón choca con un átomo le cede parte de su energía mediante la acción de choques elásticos (la energía total del sistema se mantiene constante), e inelásticos (la energía total del sistema no se conserva).

Como producto de los sucesivos choques el neutrón pierde velocidad en forma gradual, hasta alcanzar una magnitud de 2,200 metros/segundo. A estos neutrones se les denomina "Neutrones Térmicos".

Si un neutrón colisiona con un núcleo atómico y sus masas son muy parecidas, entonces el neutrón pierde una gran cantidad de energía. Mientras más se asemejen sus masas, mayor será la pérdida de energía. Por lo tanto, los choques que aseguran gran pérdida de energía ocurren con los núcleos de los átomos de Hidrógeno. El proceso por el cual los neutrones reducen su velocidad en forma gradual recibe el nombre de "Termalización" o "Moderación de Neutrones".

Los neutrones térmicos se pueden desintegrar, formando un protón y un electrón, o bien pueden ser absorbidos por los núcleos de los átomos circundantes, dando lugar a reacciones nucleares, como por ejemplo la fisión nuclear.

2.6 Actividad Radioactiva

La hipótesis básica de la teoría estadística del decaimiento radioactivo es que, cualquiera que sea la edad del núcleo, su probabilidad de desintegración por unidad de tiempo es una constante.

Si se designa por la letra λ , la probabilidad constante de desintegración de un núcleo por unidad de tiempo, también llamada **constante de desintegración** y por N el número de núcleos presentes en un instante t , se puede escribir:

$$dN = -\lambda \times N \times dt \quad (2.1)$$

El signo negativo, es para indicar que se está realizando una transformación y por ende disminuye el número de átomos.

La expresión (2.1) da el número de núcleos radiactivos que se transforman en un tiempo dt . La disminución del número de núcleos es proporcional a una variación del tiempo determinada y al número de núcleos presentes. Dicha relación corresponde a una ecuación diferencial, que podrá ser integrada al darse N_0 , que es el número de núcleos presentes al tiempo $t = 0$

Al integrarse (2.1) se tiene la siguiente expresión:

$$N = N_0 \times e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

Luego:

$$\ln = \left(\frac{N}{N_0} \right) = - \lambda t \quad (2.3)$$

En la práctica el concepto de **actividad** resulta más útil que el de núcleos transformados y la actividad se mide a través de contadores.

La actividad **A**, correspondiente a una cantidad de núcleos radioactivos, es un estado particular de energía para un tiempo dado, y es el cociente de dN por dt donde dN es el número esperado de transiciones nucleares del estado de energía en el intervalo de tiempo dt .

$$A = \left(\frac{dN}{dt} \right) \quad (2.4)$$

La unidad de actividad es el recíproco del segundo, s^{-1} , con el nombre especial de bequerel (Bq).

De las expresiones (2.1) y (2.4) se tiene:

$$A = \left(\frac{dN}{dt} \right) = -\lambda N \quad (2.5)$$

Como ya se mencionó, el signo (-) indica, que el número de átomos radioactivos disminuye con el tiempo y λ recibe el nombre de **constante radioactiva**, y se define como "la fracción de átomos que se desintegra por segundo, por cada átomo radioactivo presente en una muestra".

La Actividad se mide en Becquerelios y equivale a una desintegración por segundo.

Otra unidad para la actividad radioactiva es el Curie, que se define como cualquier cantidad de material radioactivo que sufre $3.7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones por segundo (dps) o $2.22 \cdot 10^{12}$ desintegraciones por minuto (dpm), las cuales equivalen aproximadamente a la razón de decaimiento de un gramo de Radio (${}_{88}\text{Ra}^{226}$). Es decir:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ (dps)}$$

$$1 \text{ Ci} = 2.22 \cdot 10^{12} \text{ (dpm)}$$

Los submúltiplos utilizados son el milicurie (mCi) y el microcurie (μCi)

La unidad de medida de la actividad en el sistema internacional es el Becquerel.

$$1 \text{ Becquerel} = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegración por segundo}$$

Pero además, se usa el Curie:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ mCi} = 37 \text{ MBq}$$

A partir de la actividad también se definen;

$$\text{Actividad específica: } \left[\frac{\text{Bq}}{\text{gr}} \right]$$

$$\text{Concentración radiactiva } \left[\frac{\text{Bq}}{\text{ml}} \right]$$

2.7 Vida Media y vida promedio

Se llama vida media, $T_{1/2}$, al tiempo necesario para que la mitad de los núcleos inicialmente en un estado de energía se transformen al tiempo necesario para que la actividad disminuya a la mitad. Así se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \times e^{-\lambda_{1/2}} \quad (2.6)$$

Donde:

$$\ln 2 = \lambda_{1/2} = 0.693 \quad (2.7)$$

Por lo que la relación entre la constante de desintegración y la vida media está dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = \left(\frac{0.693}{t_{1/2}} \right) \quad (2.8)$$

La vida media se expresa en la unidad de tiempo que resulte más conveniente para cada elemento. Puede ser segundos, minutos, horas, meses o años.

No es posible decir exactamente cuando un núcleo en particular se va a desintegrar ya que el proceso de decaimiento es probabilístico. La **Vida media promedio** de un núcleo se denota por τ y está dada por una suma de las vidas medias de todos los núcleos dividida entre el número inicial de núcleos.

Matemáticamente, esto se puede representar como sigue:

El número de núcleos que decae entre t y $t + dt$ se obtiene del número de átomos presentes al tiempo.

$$t: N = N_0 \times e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

Por lo que se tiene:

$$dN = -\lambda \times N_0 \times e^{-\lambda t} \quad (2.10)$$

La vida media de un núcleo, en particular va a estar comprendida entre 0 e ∞ . Así, la vida media promedio de un núcleo está dada por:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} -\lambda t * N_0 * e^{-\lambda t} dt = -\lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.11)$$

Por lo tanto, empleando (2.8) y (2.10) se tiene la siguiente expresión:

$$t_{1/2} = 0.693 * \tau \quad (2.12)$$

2.8 Definición de trazador y trazador Radioactivo

Puede definirse como trazador a toda sustancia que incorporada a un proceso físico o químico, permite estudiar su comportamiento y evolución.

Específicamente cualquier elemento o compuesto, incorporado a una sustancia es un trazador si permite seguir el comportamiento de ésta, en un determinado proceso.

Se tienen desde los más sencillos, como hojas de árboles y fragmentos de madera y paja, que se han utilizado para observar la dirección y velocidad de aguas hasta los estudiados en este trabajo y que son los trazadores radioactivos que se emplean no sólo para la industria petrolera, sino en muchas áreas más de la ingeniería.

2.8.1 Trazadores Radioactivos

Los trazadores radioactivos son compuestos que contienen en su estructura isótopos radioactivos o radioisótopos, que al emitir radiación de algún tipo facilitan el estudio del proceso en cuestión.

Cada radioisótopo tiene una energía de radiación característica que permite identificarlo plenamente y su radioactividad disminuye con el tiempo, en forma exponencial. Esta disminución permite definir un valor denominado periodo de semidesintegración, valor característico que representa el tiempo necesario para que la actividad del elemento disminuya a la mitad de su valor inicial. Por tanto, transcurrido un cierto tiempo el elemento radioactivo desaparece del proceso transformándose en elemento estable.

Los radioisótopos presentan ventajas enormes sobre cualquier otro tipo de trazador: se pueden incorporar a cualquier proceso sin que éste sufra alteraciones debido a que los isótopos radioactivos son químicamente indistinguibles de los átomos estables; se pueden detectar a distancia sin necesidad de muestrear el sistema ya que se detecta la radiación que emiten; además, los instrumentos de detección son tan sensibles que bastan concentraciones ínfimas de un radioisótopo para poderlo detectar.

2.9 Radioisótopos empleados en la industria petrolera

En la industria petrolera se tienen varios tipos de radioisótopos y entre los más empleados para los procesos de inyección se encuentran los siguientes:

TRITIO (H3). Comúnmente usado como agua tritiada. Es un emisor de β^- puro de baja energía, 0.0186 MeV, con una vida media de 12.33 años. Sigue perfectamente el movimiento del agua, tiene las ventajas de ser barato, fácil de adquirir y grado de toxicidad bajo; además es fácil de almacenar ya que no requiere grandes blindajes.

ODO 131. Empleado como yoduro de sodio o de metilo o trioleína. Es emisor β^- de 0.61 MeV y γ de 0.364 y 0.637 MeV. Su vida media de 8.041 días lo hace apto para trabajos menores a 30 días de duración. Es fácil de manejo y transporte.

ODO 125. Usado como yoduro de sodio. Es emisor γ de 0.0354 MeV y su vida media es de 59.7 días que es perfectamente adecuada para experiencias de mediana duración. Su comportamiento es semejante al que presenta el I-131.

Dentro de la medición del tipo de energía que emiten ciertos elementos radioactivos, algunos son mas perjudiciales a la exposición, es por esto que se tienen diferentes tipos de emisión de partículas. Algunos de los radioisótopos más empleados en la industria petrolera se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 2.2 Radioisótopos empleados en la industria petrolera.
Emisores Beta.

<i>Radioisótopo</i>	<i>Vida Media</i>	<i>Energía Máxima (MeV)</i>
H ³ (Trítio)	12.6 años	0.018
C ¹⁴ (Carbón)	5568 años	0.155
P ³² (Fósforo)	14.3 días	1.701
S ³⁵ (Azufre)	871 días	0.167
Cl ³⁶ (Cloro)	4.4*10 ⁵ años	0.714
Ca ⁴⁵ (Calcio)	152 días	0.254
Kr ⁸⁵ (Kriptón)	9.4 años	0.695
Sr ⁸⁹ (Estroncio)	53 días	1.463
Sr ⁹⁰ (Estroncio)	28 años	0.61
Y ⁹⁰ (Ytrio)	64 horas	2.18
Y ⁹⁰ (Ytrio)	59 días	1.54
Tc ⁹⁹ (Tecnecio)	2.15*10 ⁵ años	0.29
Pr ¹⁴³ (Praseodimio)	13.95 días	0.932
Pm ¹⁴⁷ (Prometeo)	2.6 años	0.223
Tl ²⁰⁴ (Talio)	3.5 años	0.765

Tabla 2.3 Radioisótopos empleados en la industria petrolera.
Emisores Gamma.

<i>Radioisótopo</i>	<i>Vida Media</i>	<i>Energía Máxima (MeV)</i>
Na ²⁴ (Sodio)	15.06 horas	2.754
Ga ⁷² (Galio)	14.3 horas	2.51
La ¹⁴⁰ (Lantano)	40 horas	2.50
Ir ¹⁹⁴ (Iridio)	19 horas	2.1
Sb ¹²⁴ (Antimonio)	60 días	2.11
As ⁷⁶ (Arsénico)	26.8 horas	1.2

Cont. Tabla 2.3		
Pr ¹⁴² (Praseodimio)	19.2 horas	1.59
Ag ¹¹⁰ (Plata)	270 días	1.516
K ⁴² (Potasio)	12.44 horas	1.51
Eu ¹⁵² (Europio)	13 años	1.12
Eu ¹⁵⁴ (Europio)	16 años	1.44
Co ⁶⁰ (Cobalto)	5.27 años	1.33
Br ⁸² (Bromo)	35.87 horas	1.312
Fe ⁵⁹ (Fierro)	45.1 días	1.289
Ta ¹⁸² (Tantalo)	115 días	1.223
Sc ⁴⁶ (Escandio)	85 días	1.12
Zn ⁶⁵ (Zinc)	250 días	1.12
Rb ⁸⁶ (Rubidio)	19.5 días	1.08
Rh ¹⁰⁶ (Rodio)	30 segundos	1.045
Cs134 (Cesio)	2.3 años	0.794
W ¹⁸⁷ (Wolfranio)	24.1 horas	0.78
Zr ⁹⁵ (Zirconio)	65 días	0.754
Nb ⁹⁵ (Neobio)	35 días	0.745
Ba ¹³⁷ (Bario)	2.6 minutos	0.662

2.10 Modelos matemáticos

Son expresiones que describen el comportamiento de flujo de un trazador en un medio poroso considerando diversos procesos físicos que, ocurren dentro del yacimiento como pueden ser:

- Convección
- Dispersión
- Decaimiento
- Adsorción
- Reacciones químicas
- ionización

Cada modelo puede considerar uno o más procesos físicos.

Los diversos modelos matemáticos existentes en la bibliografía, representan una aproximación del comportamiento de ciertos parámetros existentes en los yacimientos, es por esto que para cada condición de estudio, se tiene uno o varios modelos representativos.

Aunque aquí sólo se mostrarán tres modelos, cabe mencionar que existen varios modelos más que podemos encontrar en la literatura técnica y son aplicables para los distintos tipos de yacimientos que existen, ya sean homogéneos o fracturados.

Para yacimientos homogéneos tenemos los modelos de:

- Modelo de difusión de Coats
- Modelo de difusión de Gershon (1969)
- Modelo de difusión de Coats y Smith (1963)

Para yacimientos naturalmente fracturados tenemos:

- Modelo de Tang y asociados (solución analítica para la fractura). (1981)
- Modelo de Jensen y Horne (1983)
- Modelo bidimensional de Walkup y Horne (1985)

No se hará mención, ni análisis de dichos modelos, sólo se mostrarán algunos para los distintos tipos de yacimientos y se mencionarán los que existen en la literatura técnica. Cabe mencionar que entre más parámetros de yacimiento se tengan en consideración, el modelo se vuelve más complejo en su solución; podemos tener desde modelos con un comportamiento lineal a modelos de dos dimensiones, además de tener involucrados a más de un proceso físico.

2.10.1 Modelo de Brigham. (1974, 2)

Este modelo es representativo de yacimientos homogéneos. Brigham demostró que había una incongruencia en varias de las soluciones previamente publicadas para el modelo de difusión, debido a que los resultados obtenidos no eran compatibles con el balance de materia.

Esta incongruencia se presenta por una inadecuada interpretación de las condiciones de frontera. Brigham hizo notar que existía una diferencia entre los datos experimentales y los resultados de los modelos matemáticos representativos del comportamiento de las concentraciones registradas en el análisis de núcleos en las mediciones efectuadas en el laboratorio.

Los modelos predicen la concentración *in situ* y la concentración medida en los núcleos que corresponde a la concentración fluyente. Para demostrar lo anterior Brigham emplea el modelo de difusión para un sistema infinito utilizando ciertas condiciones iniciales y ciertas condiciones de frontera.

Después de arreglos matemáticos se tiene su modelo matemático que es el siguiente:

$$C(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{x - vt}{2(Dt)^{0.5}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left[\frac{vx}{D} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{x + vt}{2(Dt)^{0.5}} \right] \quad (2.13)$$

Donde:

C = Concentración del trazador, (M/L³)

D = Coeficiente de dispersión, (L²/t)

$erfc$ = Función complementaria, (adim)

t = Tiempo desde la inyección hasta la medición en el pozo productor, (días)

x = Distancia recorrida del trazador desde el pozo inyector al pozo productor, (L)

v = Velocidad del fluido, (L/t)

2.10.2 Modelo de Jensen y Horne. (1983, 9, 10)

Este modelo se aplica para medios porosos con fracturas naturales. Los autores de dicho modelo desarrollaron un modelo matemático para describir el flujo de trazadores a través de medios porosos. Es un modelo de doble porosidad en el que se describe una fuente de trazador constante (C_0) que viaja a través de una fractura y una zona de la matriz en la cual el fenómeno de dispersión está presente.

A partir de un balance de materia y, considerando los fenómenos de convección en la fractura y, simultáneamente, difusión y adsorción en los poros de la matriz, Jensen y Horne describen estas condiciones de flujo mediante algunas expresiones de las cuales al realizar algunos arreglos matemáticos se tiene el siguiente modelo:

$$C = C_f \frac{Q}{M} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\sqrt{\pi(\alpha_2 t - 1)^{0.5}}} \exp\left(-\frac{\alpha_1^2}{(\alpha_2 t - 1)}\right) \quad (2.14)$$

Donde:

C_f = Concentración del trazador en la fractura

Q = Gasto volumétrico

t = Tiempo desde la inyección hasta la medición en el pozo productor, (días)

$\alpha_1 = \alpha$

$\alpha_2 = \beta$

$\beta = 1/t_w R$

2.10.3 Modelo de Ramírez y Cois. (1988, 17)

Este modelo describe el trazador en un medio poroso constituido por dos regiones, una móvil (sistema de fracturas) con procesos de difusión y convección y una región estancada (matriz) con procesos de difusión y adsorción, además el efecto de decaimiento radioactivo del trazador, a diferencia de los otros modelos que no lo consideran.

La solución que presenta está en el espacio de Laplace por lo que requiere un método de inversión para su cálculo. Los parámetros que determinan son porosidad, anchura de la fractura, velocidad de flujo del trazador en la fractura, longitud de la fractura, coeficientes de difusión en la matriz y en la fractura.

El siguiente modelo matemático corresponde al análisis con trazador radiactivo a través de un medio naturalmente fracturado:

$$C = \frac{1}{S} \exp\left(\frac{X_D P_{el}}{2}\right) \exp\left(-X_D \sqrt{\frac{P_{el}^2}{4} + P_{el} \left(S + \xi \sqrt{\frac{P_{e2}}{R} (S + \gamma)}\right)}\right) \quad (2.15)$$

Donde:

C = Concentración del soluto en la solución de la fractura, (M/L³)

P_{e1} = Número de Peclet en la región móvil

P_{e2} = Número de Peclet en la región inmóvil

S = Factor de daño, prueba de presión, (Adim)

X_D = Parámetro de ajuste, (Adim)

ξ = Parámetro de ajuste

γ = Tipo de trazador radioactivo

CAPÍTULO 3

Usos y aplicaciones de radiotrazadores en la industria petrolera

Como se señaló en la introducción del presente trabajo, el empleo de los trazadores en la industria petrolera ha sido muy variado a lo largo de la historia. Su uso se inició con la aplicación de los mismos para conocer la calidad de las cementaciones de los pozos, pero al paso del tiempo se ha convertido en una herramienta bastante confiable para otras áreas de la industria petrolera.

Dentro de la industria petrolera se ha tenido la necesidad de conocer ciertos parámetros y/o estados físicos tanto de los yacimientos, pasando por toda la estructura y los estados mecánicos de los pozos, llegando a las instalaciones superficiales de producción.

El empleo de los trazadores radioactivos ha sido fundamental ya que se tienen resultados inmediatos y la gran ventaja es que se dan *in situ* y esto reduce tanto tiempo como costos.

La información presentada en este capítulo, está basada en los reportes del IMP y el autor de dichas publicaciones es Jesús Nájera Franco (1968,15). En dichos trabajos se menciona el uso que se le han dado a los trazadores radioactivos a lo largo de varios años dentro de la industria petrolera, en especial a las áreas de perforación y terminación de pozos, estimulación de pozos, revisión de tuberías, etc.

3.1 Perforación y terminación de pozos

Los trazadores son ampliamente empleados, dentro de algunas operaciones de perforación y terminación de pozos, para medir la profundidad de la invasión del lodo dentro de la formación. Agua tritiada o trazadores químicos son usados para preparar el volumen total del lodo de perforación, y determinar la concentración deseada del trazador justo antes de perforar a través del intervalo de interés. Se toman núcleos de ese intervalo de la formación y dichos núcleos son analizados en el laboratorio. En el laboratorio son preparados los núcleos y el agua que contienen es extraída para ser analizada con el trazador que contiene.

Cuando se preparan las lechadas de cemento en una operación de cementación de tubería, cualquiera que ésta sea, sabemos que la calidad del cemento es muy importante para lograr una cementación exitosa, sin contratiempos y sin problemas de pérdida por filtrado, por fraguado anticipado o por retardo del propio fraguado. Aquí el uso de trazadores constituye una herramienta muy valiosa para conocer la calidad del cemento, y consiste en la aplicación de una fuente radiactiva al cemento.

La fuente radiactiva puede ser una cápsula sellada de cesio de unos 50 milicurios. La fuente se fija perfectamente a la línea por donde circula la lechada, precisamente antes de pasar por las bombas. El detector se fija también a la tubería pero diametralmente opuesto a la fuente.

La radiación Gamma, atraviesa las paredes de la tubería, el flujo de la lechada y solo una fracción logra llegar hasta el detector. Mientras mayor sea la densidad de la lechada, mayor es la cantidad de radiación absorbida. Los valores se dan en Kg/lt o en lb/gal.

Cabe mencionar que el método es seguro y que la lechada de cemento no es contaminada por la radiación del trazador. Se tienen varias ventajas en estas operaciones como son la lectura inmediatas y continuas, la simplicidad, se evita el muestreo de lechadas, se tiene el valor de la densidad de la lechada cuando se requiera, etc.

La siguiente figura muestra cómo podemos hacer uso de los trazadores radioactivos para el caso anteriormente señalado.

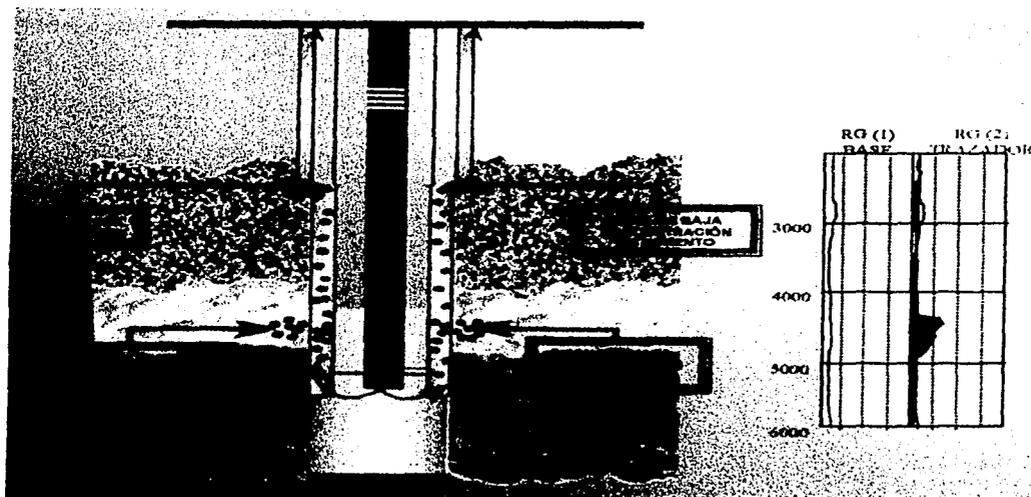


Fig. 3.1 Registro de calidad de cementación en tuberías

3.2 Pérdidas de circulación

Cuando perforamos un pozo, se usa un lodo especial llamado fluido de perforación el cual tiene diferentes funciones. Con frecuencia la composición química y física del lodo cambia, ya sea porque se le agreguen agentes químicos para controlar su viscosidad, para aumentar o disminuir su densidad o por contaminación del agua de las formaciones.

Si aumenta el peso del lodo de perforación, aumenta la presión hidrostática. Esto puede ocasionar que unas o más formaciones permeables se fracturen y principien a aceptar lodo, esto es, se llegan a "perder" grandes cantidades de fluido (hasta 600 m³ de lodo o más) impidiendo primero la circulación a profundidades mayores que la zona de pérdida y después paralizando totalmente la perforación.

Se puede localizar esa zona, agregando un radioisótopo apropiado al fluido de perforación. El lodo "marcado" al fluir hasta el punto de interés, origina una gran concentración del material radioactivo, precisamente a la profundidad en que la formación permeable se fracturó aceptando gran cantidad de volumen de lodo. Con un registro de rayos Gamma posterior a la inyección, es posible localizar exactamente la zona.

Con esta información tenemos la oportunidad de colocar materiales obturantes en el intervalo de interés y en el que se está dando la pérdida por filtrado, de esta manera no se tendría que realizar a lo largo de todo el pozo donde no hay tubería de revestimiento.

3.3 Tubería

También se emplea como marcadores o indicadores de tubería, en ciertas terminaciones, particularmente en pozos altamente desviados o en pozos horizontales, se colocan marcadores radioactivos de larga vida en las tuberías antes de correrla en el pozo, esta práctica es muy recomendable para tener una referencia de la vida útil de la tubería sin necesidad de emplear cables o registros para conocer el estado actual de la tubería.

En algunas ocasiones podemos tener problemas clásicos como es la pérdida del fluido en operaciones de perforación e incluso pérdida de volúmenes de producción debido a una ruptura en la tubería.

El problema es determinar dónde se encuentra dicho rompimiento por el cual se está fugando el fluido, aquí lo importante es localizar la zona para poder efectuar las operaciones de reparación de pozos. Se aplica así, una prueba de admisión en la cual se determina el nivel donde existe el problema en la tubería. Ver figura 3.2.

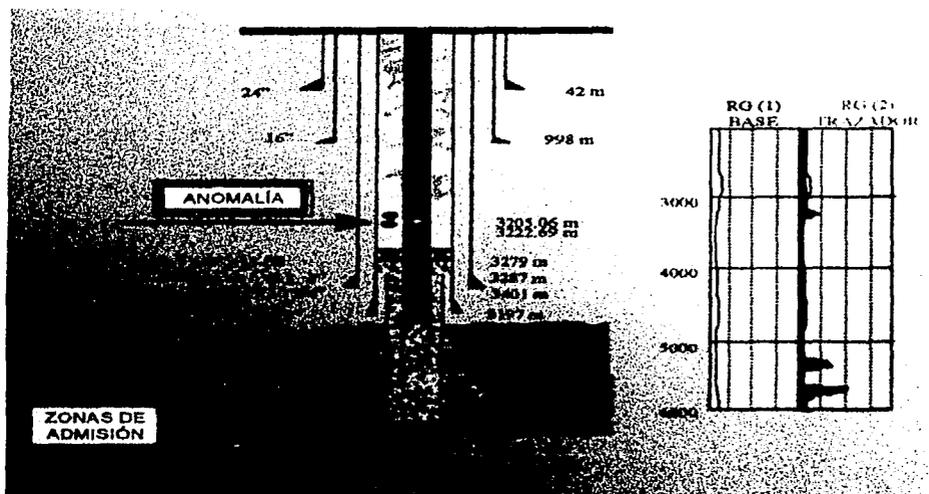


Fig. 3.2 Análisis de estados físicos de tuberías

3.4 Producción

Una de las operaciones más empleadas en la industria petrolera para hacer producir más un yacimiento es la aplicación del fracturamiento hidráulico. Esta operación consiste en aumentar al valor de la permeabilidad de la formación mediante uno o varios disparos, para crear canales o aberturas en la cara de la formación para que los fluidos encuentren menos restricción al flujo y de esta manera se pueda incrementar el volumen de hidrocarburos producidos.

Después del fracturamiento, lo más importante es conocer dónde y cómo se produjo la fractura. Para esto se han utilizado diferentes métodos de trazadores radioactivos. En la figura 3.3, se puede observar la manera de detectar la profundidad de la fractura.

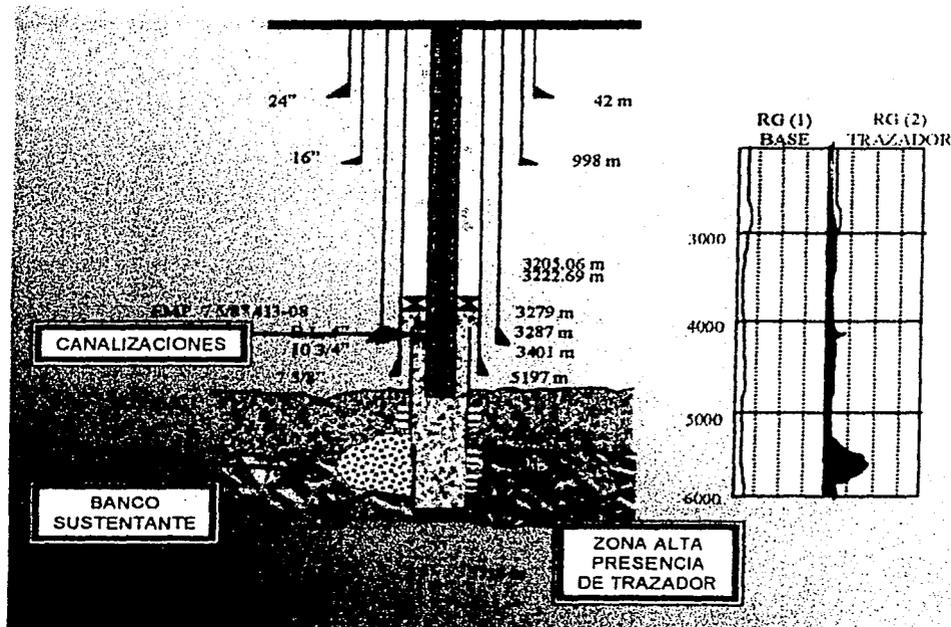


Fig. 3.3 Registro de calidad de estimulación y fracturamiento

Uno de los métodos consiste en agregar partículas relativamente grandes al agente hidráulico con que se provoca la fractura. Después de la inyección se efectúa un registro de radioactividad contra profundidad del pozo a una escala dada de medición. De la forma y valores de la gráfica, se obtiene la localización y el tipo de la fractura.

También se emplean en operaciones de empacamiento, y la forma de operar son muy similares a las descritas en el registro de cementación.

Aquí se registra el espesor del empacamiento, con esto se pueden diseñar tratamientos con el empleo de diferentes trazadores para un pre-empacamiento en operaciones de perforación. También se emplean en operaciones de estimulaciones de pozos y se menciona que aquí fue donde se inició el uso de los trazadores.

3.5 Localización de obstrucciones en ductos

La localización de obstrucciones en ductos que conducen hidrocarburos es un problema que a menudo se presenta en el área de producción y aquí también podemos citar a los trazadores radioactivos como herramienta para la ubicación de los problemas que esto representa.

Como sabemos la limpieza y el mantenimiento de las líneas de conducción de hidrocarburos se realizan mediante la corrida de "diablos" (*) los cuales van limpiando el interior de la tubería, pero dadas las longitudes de los ductos es muy frecuente el taponamiento de los mismos debido a todos los sólidos que se van depositando en las caras internas de la tubería, así que la detección del lugar donde existe la obstrucción es de suma importancia para reducir tiempos y costos de la reparación de las tuberías.

Empleando radioisótopos para su detección, una fuente de rayos Gamma relativamente grande se instala en un "diablo", con este arreglo se recorre la tubería en dirección al sitio donde se supone que existen una o varias obstrucciones. Para obligar al "diablo" a viajar a través del ducto de una estación a una terminal, se bombea agua o aceite a alta presión.

(*) Diablo.- Elemento físico empleado para la limpieza e inspección interna de la tubería.

Antes del advenimiento de los radioisótopos como herramienta industrial en la localización de obstrucciones, se emplearon los métodos acústicos. Éstos presentan un serio inconveniente: se necesitan personas altamente capacitadas que interpreten correctamente la gran variedad de sonidos que se escuchan en las tuberías.

Otro problema es la accesibilidad a las tuberías debido a la topografía del terreno por donde se "enterró" la tubería. Si se coloca una fuente de cobalto-60 de 200 mCi en uno de los "diablos" usados comúnmente para la limpieza de ductos, debidamente protegida y aislada para evitar contaminación y exposiciones perjudiciales, es posible detectar la ubicación del "diablo" hasta la profundidad de dos metros bajo tierra.

Además si se conoce la trayectoria del ducto sobre la superficie, se pueden rastrear fácilmente los movimientos del "diablo" dentro de la tubería. El paso del "diablo" se debe comprobar en las estaciones de válvulas, si están empacadas cuando mucho a 5 kilómetros.

Si el diablo no pasa por el último punto de detección indica un atoramiento en el tramo anterior. La localización de la fuente radiactiva y simultáneamente de la obstrucción se reduce a rastrear desde la superficie del terreno, sólo unos pocos kilómetros a partir de la última estación por donde se comprobó el paso del "diablo".

Al encontrar la zona taponada, se procede a cortar el tramo de tubería donde está atorado el "diablo" para posteriormente colocar otro tramo de tubería y que esta línea continúe con su función de transporte. Ver figura 3.4.

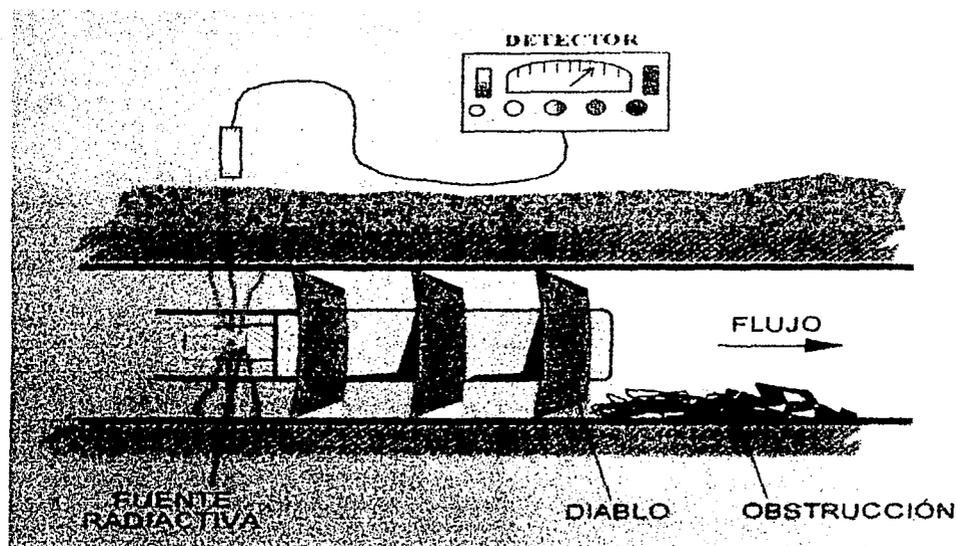


Fig. 3.4 Localización de "diablos" perdidos

La localización de la fuente radiactiva se debe hacer con precisión no menor de 3 centímetros, puesto que el detector se puede colocar directamente sobre la tubería. Esto se hace con el objeto de localizar el "diablo" con toda exactitud para evitar cortes innecesarios en la tubería.

3.6 Medición de fluidos

El conocimiento exacto y completo de los flujos (gastos, velocidades) es de vital importancia en la operación eficiente de las líneas de transporte de fluidos a grandes distancias o en plantas de proceso.

Las técnicas radioisotópicas agregan una información más valiosa que la que se tiene con los métodos convencionales de medición de flujos. Se obtiene una gran precisión en los resultados y las mediciones, se pueden realizar en corrientes de materiales líquidos, gaseosos o sólidos.

Se tiene un método muy simple que se denomina método de dos pulsos y se aplica cuando se conoce la sección transversal de la tubería en la que se realizan los estudios del flujo.

Consiste en inyectar instantáneamente en la corriente, un trazador adecuado a las características del fluido. Se mide el tiempo transcurrido entre el paso del trazador frente a dos detectores, separados a una cierta distancia conocida y de manera que del punto de inyección al primer detector se consiga una mezcla perfecta entre el trazador y el fluido.

El equipo de detección consta de lo siguiente:

- Dos contadores Geiger o de centelleo
- Un medidor de relación (ratemeter)
- Un graficador

La velocidad se mide de la siguiente manera:

La distancia entre los detectores se conoce, el tiempo que tarda el radioisótopo en recorrer esa distancia es medida por un cronómetro o se lee en la grafica, midiendo la separación entre los centróides de los pulsos. Con un cálculo simple se obtiene la velocidad. El gasto se calcula a partir de la sección transversal del ducto.

Para calcular la velocidad en flujo de gases hay que tomar en cuenta las caídas de presión entre el primer y el segundo detector, las condiciones de temperatura y presión que prevalecen durante la prueba y por ultimo, la compresibilidad del gas que se estudia.

3.7 Identificación de líneas

En ocasiones se tiene el problema de que, debido a los gastos que se manejan en algunas centrales de bombeo, es necesario contar con ramales por donde se hará fluir el aceite o en el caso de gas se tendrán gaseoductos para su compresión y posterior transporte. La distancia entre estación y estación, ya sea de bombeo o de compresión, juega un papel muy importante ya que se corre el riesgo de no identificar las líneas de llegada con respecto a las líneas por donde inició el transporte de los hidrocarburos.

La figura 3.5 muestra de manera sencilla la identificación de las líneas empleando material radioactivo.

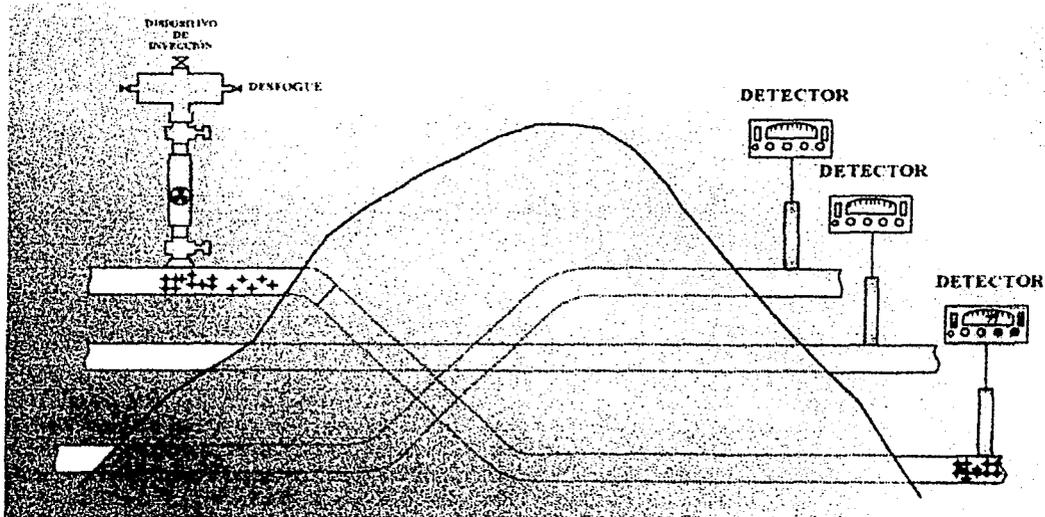


Fig. 3.5 Identificación de líneas a distancia

Si se presenta esta confusión, se resuelve aplicando alguna sustancia radiactiva que sea compatible con el fluido en estudio.

Se procede a la inyección del material radioactivo y al final de las líneas se colocan detectores de radioactividad, que al momento del arribo del fluido "marcado" con el trazador, se podrá registrar que hay concentraciones de material radioactivo y con esto se logrará identificar de donde provienen los fluidos de cada una de las líneas de transporte de hidrocarburos.

3.8 Usos de trazadores radioactivos en otras áreas de la ingeniería petrolera

En proyectos de recuperación secundaria y de recuperación mejorada además de producción, son usados los trazadores y se mencionan algunas aplicaciones por ejemplo:

- ✓ En la determinación de un perfil mecánico integral para una prueba de inyección.
- ✓ Pruebas de trazadores entre pozos
- ✓ En estudios generales de hidrocarburos
- ✓ En la medición del tiempo de retención en equipo en superficie

Las aplicaciones de los trazadores radioactivos en el área de yacimientos es un poco mas difícil de ver físicamente, por obvias razones al estudiar los yacimientos pero lo que es una realidad es que, día con día el empleo de estas técnicas es más demandado en la industria petrolera ya que como se ha mencionado la aplicación de pruebas de trazadores, ayuda en la toma de decisiones sobre los proyectos de recuperación secundaria o mejorada.

Lo que es un hecho demostrado a través de la historia de la industria petrolera es que la aplicación de los trazadores radioactivos es muy variada y permite la ubicación de puntos de interés para todas las áreas de interés; la combinación y el intercambio de datos provenientes de otro tipo de pruebas, complementan la mayor cantidad posible de información para beneficio nuestro, así como, para continuar con éxito las políticas tanto de perforación, terminación y reparación de pozos, y por consiguiente contamos con los esquemas de producción más benéficos para los yacimientos.

Generalmente, con excepción de los trazadores radioactivos, todos los demás trazadores están disponibles. Los trazadores radioactivos requieren un proceso especial tanto para el muestreo como en su manejo. Estos procedimientos de seguridad los regula el organismo asignado por parte de cada uno de los países en los que se manejen este tipo de materiales radioactivos. En el apéndice A, se menciona la importancia del buen manejo de material radioactivo así como la adquisición de licencias para el uso que sea requerida.

3.9 Pruebas de pozo a pozo

Este tipo de pruebas son el tema principal de este trabajo, por lo que en los capítulos posteriores, se tratarán con todo detalle. Sin embargo en esta sección se presenta de manera general su aplicación.

Consisten en la inyección de un fluido que contiene una o más sustancias radiactivas a las que se les denominan trazadores. Dichas sustancias son incorporadas al fluido de inyección que a su vez es introducido por un pozo inyector, el cual ha sido previamente acondicionado para tales efectos.

Al seleccionar un pozo inyector necesariamente se debe tener al menos un pozo productor que fungirá como un pozo de observación o monitoreo. La finalidad es recolectar muestras del o los pozos productores para que se les analice y determinen ciertos parámetros del yacimiento en estudio.

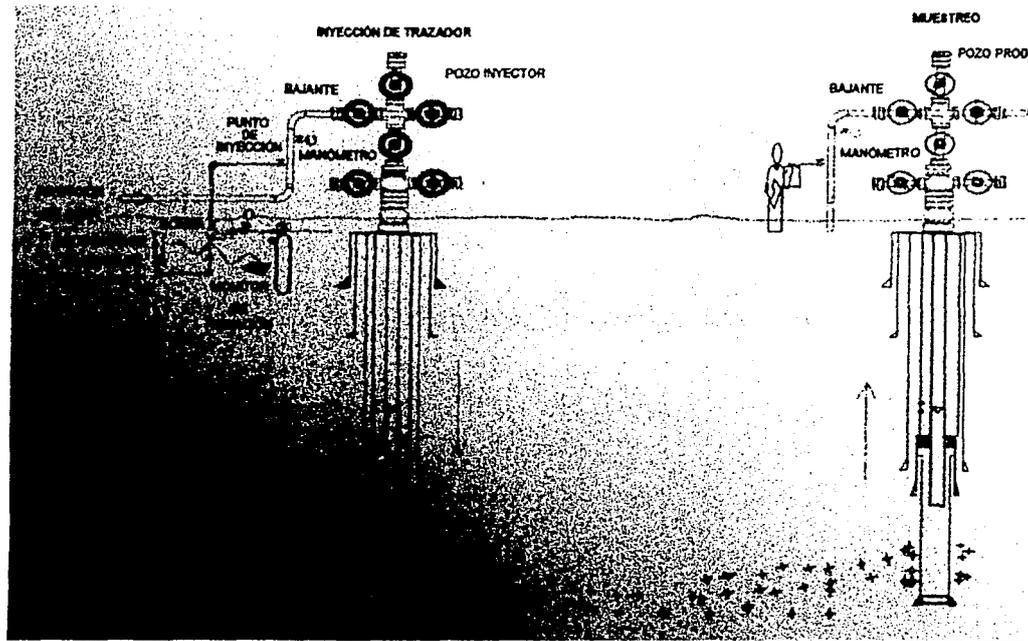


Fig. 3.6 Pruebas de radiotrazado de pozo a pozo

El fluido inyectado al ser "marcado" con un trazador, proporciona cierta información necesaria para la caracterización del yacimiento; el trazador, que puede ser un material radioactivo, refleja un comportamiento similar al del fluido de inyección y al tener una muestra del pozo productor, es posible identificar el contenido de radioactividad en dicha muestra y proceder al análisis del comportamiento del sistema roca-fluidos del yacimiento.

Para diseñar una prueba entre pozo y pozo, es necesario contar con varios elementos. La selección de un pozo inyector, el tener un número adecuado de pozos de monitoreo, un trazador compatible tanto con el fluido como las características de la roca del yacimiento, un buen programa de muestreo, equipo de medición y detección de la actividad radioactiva y otros elementos que en su conjunto crean lo que aquí se expone como es una prueba de trazadores radioactivos.

CAPÍTULO 4

Trabajo de campo y análisis de muestras

Con base en el diseño de la prueba de trazadores que se realizó, se procede al trabajo de campo y análisis de muestras. En este capítulo se presenta tanto el procedimiento como las herramientas necesarias para realizar el trabajo de campo y el análisis de las muestras.

El Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), ha sido el responsable de la mayoría de las aplicaciones de trazadores radioactivos en México, a través del Departamento de Tecnología Nuclear. A solicitud de Petróleos Mexicanos (PEMEX), el Departamento antes mencionado, diseña y realiza una prueba entre pozos, de trazadores radioactivos. Tal es el caso de la aplicación que se muestra en el Capítulo 5, en el cual se ilustra el procedimiento empleado en el Campo Giraldas.

Cabe hacer un reconocimiento al Departamento de Tecnología Nuclear del IMP, a cargo del Químico Edison Pérez y del Ingeniero Guillermo Falconi, por la labor que realizan en el trabajo, que representa realizar pruebas de trazadores radioactivos. Sin duda el factor de riesgo al estar expuesto al manejo de sustancias radioactivas es alto; la capacitación en seguridad radiológica es constante, la emisión y renovación de permisos para el manejo de material radioactivo es un trámite que no es sencillo y sobre todo, el contacto continuo con dichas sustancias hacen que el trabajo realizado sea considerado con mayor razón, además que el personal se somete a constantes estudios médicos para verificar su estado de salud.

El uso de los trazadores radioactivos para la caracterización de yacimientos, de alguna manera se ha subutilizado en el sentido que sólo se han obtenido resultados cualitativos.

Esto se debe a que aún la técnica del análisis de pruebas de trazadores no se han desarrollado completamente, y el estudio para una mejora se está realizando hasta hoy en día, desarrollando y optimizando elementos que forman parte de las propias pruebas de trazadores radioactivos.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos con este tipo de pruebas, tienen que complementarse con información proveniente de otras fuentes, como pruebas de presión, registros geofísicos, sísmica, análisis de núcleos, etc.

Como se mencionó, en el Capítulo 3, las pruebas entre pozos de trazadores radioactivos, consisten en la adición de un material radiactivo a un fluido de inyección al yacimiento. Además se cuenta con pozos productores destinados al muestreo para el monitoreo constante en la producción de alguna muestra de aceite o gas que contenga material radiactivo.

En la introducción de este trabajo, se mencionó la metodología del análisis de las pruebas entre pozos de trazadores radioactivos, en el cual se mencionó el diseño de la misma como una parte fundamental de la propia prueba.

Recordando un poco los antecedentes de las pruebas de trazadores, se tiene que el porcentaje de éxito no fue el esperado, eso fue sin duda por varias razones que de cierta manera era normales cuando se intentan nuevas formas en la caracterización de yacimientos petroleros.

Para iniciar el diseño de una prueba, se deben conocer primero las necesidades y problemas que enfrenta PEMEX o cualquiera que esté solicitando la prueba de trazadores, las causas que provocan la pérdida de presión y producción de aceite, así como la recuperación del mismo. Se debe hacer una recopilación de información general del campo para seleccionar los pozos que estarán involucrados en el estudio, tanto los productores como el pozo inyector.

A continuación, se menciona brevemente algunos problemas que se presentan derivados de un diseño inapropiado. Los componentes más importantes del diseño son: selección y actividad del trazador a inyectar, pozo de inyección, pozos de monitoreo o de observación y programa de muestreo.

Algunos de los problemas más comunes son: la elección del trazador no era la más adecuada y en ocasiones el trazador no seguía el comportamiento del fluido de inyección; la selección del pozo inyector no era el más propicio, debido a una falta de conocimiento del comportamiento del yacimiento, y también debido a cuestiones que tenían que ver directamente con la producción de hidrocarburos. Si se tiene una mala elección del trazador, también repercute en que el trazador empleado, podía perderse debido a procesos físicos y químicos que se dan en el yacimiento, es decir, por procesos de adsorción, difusión, o una degradación del mismo trazador.

La selección de los pozos de monitoreo en ocasiones resultaba errónea y esto puede ser porque, no se analizaba de una manera general la información que se tenía a la mano, para este tipos de pruebas. Podríamos decir que la selección de pozos de muestreo obedecía a la vecindad con el pozo inyector cuando en la actualidad hemos visto que el flujo de los fluidos a través del medio poroso es impredecible y en ocasiones la irrupción del trazador se da en pozos que no se contemplaban dentro del programa.

Si la selección del trazador es errónea y simultáneamente se cometen errores en la asignación de pozos de monitoreo, la irrupción del trazador no podría darse correctamente en los pozos en los que se está muestreando y los más seguro es que los datos analizados resultarán incorrectos.

La frecuencia del muestreo es muy importante y ahora se sabe que no hay que escatimar en el muestreo; ya que esto es directamente proporcional a la información obtenida de la prueba, es decir, que entre más muestras de los diferentes pozos se tengan, mayor será la información que se tendrá para el análisis y posteriormente en los resultados se mostrará el porqué es tan importante la frecuencia de muestreo. Si la recolección de las muestras es muy poca en los pozos de monitoreo, se corre el riesgo de obtener muestras en donde no se registren concentraciones del trazador, ya sea por que no se identifica exactamente el tiempo de arribo de las primeras concentraciones.

También con respecto al muestreo, se tiene que hoy en día se manejan con mucho cuidado, tanto la preparación de dichas muestras para el conteo como la identificación de las mismas, anteriormente era muy fácil confundirlas y esto derivaba en información totalmente errónea.

Entre los principales objetivos de los estudios radiotrazado, se tienen la caracterización dinámica de flujo de los fluidos, de aquí, podremos conocer las características que rigen el flujo del fluido a través del yacimiento y esto es importante, ya que contribuye a la toma de decisiones, sobre los proyectos de recuperación secundaria y/o mejorada.

Al considerarse un proyecto, se deben tomar en cuenta las características del Campo, basándose en la información proporcionada por PEMEX; además de las características del fluido (agua o aceite) del yacimiento, la selección del o los trazadores radioactivos para la aplicación adecuada en los estudios de inyección y durante la propia aplicación.

4.1 Componentes importantes de la prueba de trazadores radioactivos

A continuación se mencionan los componentes más importantes que intervienen en la prueba de trazadores radioactivos, sus funciones y las razones por las cuáles se procede de esta manera en la elección de dichos elementos.

4.1.1 Pozo inyector

Se debe seleccionar el pozo de acuerdo a las características del mismo, esto es revisando tanto la información, como los valores del gasto de inyección, así como los valores de presión a los cuales opera el pozo. Estos datos son importantes para no tener problemas de pérdida por filtrado en la operación de inyección.

4.1.2 Pozos de monitoreo

Cuando se hace la selección de los pozos de monitoreo, es muy importante la selección de todos los pozos donde se espera el arribo del trazador. Técnicamente, todos los pozos activos deberían de estar bajo constante monitoreo, sin embargo existe el factor económico como una limitante para destinar cualquier número de pozos como de monitoreo, y también interviene la frecuencia de muestreo que cada uno proporciona con respecto a los costos de dicha operación que, en definitiva es importante para el análisis; por esto se están creando métodos y herramientas que ayuden a la selección sistemática de los pozos de monitoreo.

En ocasiones se cuenta con otros pozos que colindan con la zona de estudio y esto ayuda al monitoreo para la obtención de mas información de las características del yacimiento, ya que con esto se puede obtener alguna información importante y revisando los tiempos de arribo, qué tan homogéneo es nuestro yacimiento en alguna de las direcciones entre el pozo inyector y el pozo productor que sirve como pozo de monitoreo.

Otra limitante en la selección de los pozos de monitoreo que no corresponde a una cuestión de ingeniería o de costos, se debe al continuo problema que se tiene cuando, para PEMEX, se tienen los pozos en ejidos o lugares donde la gente no conoce la complejidad de la aplicación de una prueba de trazadores radioactivos.

4.1.3 Selección, volúmenes y concentraciones de trazador

La selección, volúmenes y concentraciones del trazador está en función de varios factores que iremos puntualizando. Uno de los factores es el tipo de trazador que emplearemos para la prueba, se deben tener compatibilidades con el fluido que se va a inyectar, así como conocer la composición química de la formación, para evitar reacciones químicas y con esto perder la concentración del trazador así como el volumen del propio trazador.

Otro factor importante en la selección del trazador es su disponibilidad y costo en el mercado. Como se estudió en los capítulos anteriores, el trazador radiactivo tiene una constante de desintegración, que va transcurriendo al paso del tiempo, además de que la construcción propia del trazador en ocasiones resulta compleja, y por ende el precio del mismo se eleva considerablemente. Durante el diseño de la prueba se deberá de calcular y considerar este factor, que sin duda es determinante en el éxito de la prueba. En el momento en que se ha solicitado el trazador se deberá de contabilizar el decaimiento radioactivo para que, al tenerlo e incorporarlo al fluido de inyección los datos leídos tanto al inicio de la prueba como en los resultados sean los correctos.

Para el ejemplo que se menciona en el Capítulo 5, el trazador empleado es **Tritio**, en realidad su costo es bajo y la disponibilidad es buena, esto se menciona ya que PEMEX solicitó el diseño y aplicación de la prueba de trazadores con seis meses de anticipación, fecha en la que se mandó "construir" el trazador.

En México el organismo responsable del manejo y adjudicación a quién solicite material radiactivo, es el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) cuya sede se encuentra entre la ciudad de Toluca, en el Estado de México y el Distrito Federal.

Como se mencionó, el costo del trazador, es un factor que determina si la prueba es económicamente rentable a realizarse; hablamos de trazadores económicos los cuáles llegan a costar cerca de 300 mil pesos (en volúmenes de 20 ml. aproximadamente), mientras que un trazador caro puede costar cerca de 2 millones de pesos y todo esto debido a los costos de preparación, manejo, envasado y transporte del propio trazador.

Mientras se consideran y cubren estos últimos factores se deben de trabajar en los aspectos químicos y físicos del trazador. Es importante calcular y tener en cuenta el coeficiente de mezcla entre el trazador y el fluido, para asegurar que se tendrá una buena concentración en el momento del arribo de alguna muestra marcada con el trazador.

De acuerdo al tipo de trazador, dependiendo del tipo de energía de emisión se calcularán los volúmenes así como su concentración ya que, como se ha mencionado la emisión de rayos Gamma y de rayos Beta se manejan de manera diferente con los equipos alternos para el registro.

Otro factor es la distancia entre los pozos, y se manejan concentraciones bajas si la distancia es relativamente corta o si se conoce, o se sabe que la intercomunicación entre los pozos puede ser mediante una fractura, el flujo del fluido marcado será mayor o menor en relación a un yacimiento más o menos homogéneo.

De manera análoga si se cuentan con distancias más grandes, se tendrán concentraciones y volúmenes mayores para asegurar que el muestreo en los pozos, se tendrán muestras marcadas con el trazador.

Para calcular los volúmenes y concentraciones de trazador para la inyección, principalmente se considera lo siguiente:

1. La detección límite de los trazadores.
2. El periodo mínimo de inyección del trazador, si es posible detectarlo en un tiempo de arribo relativamente corto.
3. La necesidad de inyectar el trazador al mismo gasto que el agua de inyección para el mismo pozo.

La cantidad de trazador radioactivo requerido para la prueba de campo es regida por dos límites: 1) La sensibilidad en la detección en el límite más bajo, esto está en función principalmente de la capacidad del equipo en la detección y 2) El nivel máximo permisible de concentración para ese o esos materiales radioactivos.

Existen varios métodos para estimar los requerimientos del trazador. El más antiguo y simple está basado en el volumen total de agua contenida en el yacimiento. Se necesita suficiente cantidad de trazador para igualar los niveles mínimos y que sean detectables los trazadores en toda el agua del yacimiento que se está estudiando.

Otro método está basado en Brigham (1974, 2) y en una ecuación que fue derivada para calcular la masa del trazador que se necesita y está en función del espesor del yacimiento, de la porosidad, de la saturación de agua, de la concentración deseada, del coeficiente de mezcla y de la distancia entre el pozo inyector y el pozo productor.

4.1.4 Muestreo y análisis en el campo

El muestreo es usualmente el componente más económico en un programa de trazadores, y como se ha mencionado, resulta ser una de las partes más importantes con respecto a la información que se obtendrá a partir de las muestras recolectadas. El muestreo resulta ser directamente proporcional a la cantidad de información obtenida en una prueba de trazadores radioactivos.

Siempre será mejor tener mayor cantidad de muestras por analizar que contar con un número insuficiente de muestras. Para asegurar un muestreo adecuado es importante que se tenga un calendario de frecuencias de muestreo, basado en modelos matemáticos.

Con las muestras obtenidas y analizadas se puede obtener una curva representativa del comportamiento del material radioactivo con respecto a su radioactividad para diferentes tiempos. Cada punto de la curva representa una muestra a un tiempo determinado con su respectivo valor de concentración. Para generar una curva representativa se necesita el mayor número de muestras posibles, ya que por ejemplo con un muestreo de cuatro puntos es imposible construir una curva que pueda ser de utilidad para el análisis.

En cuanto se tenga una muestra con concentración de radioactividad se deberá seguir con el procedimiento; hasta que las últimas muestras ya no contengan material radioactivo, para poder asegurar que se ha detectado todo el material radioactivo posible que se inyectó para la prueba del trazador radioactivo.

La frecuencia del muestreo está también relacionada directamente con la duración del tiempo de inyección, de la vida media del radioisótopo y con la distancia entre el pozo inyector y el o los pozos productores.

El muestreo puede ser de dos maneras, a la salida de los pozos y en los separadores. Si se emplea esta manera, se requiere de una separación del agua de formación que viene mezclada con el hidrocarburo producido. Esto se realiza en "laboratorios de campo" donde a la muestra se le separa, se le analiza y se obtienen datos como son la densidad, la relación gas-aceite (RGA), temperatura, etc.

Con respecto a la segunda manera de análisis de muestras, la función de los separadores es "separar" la corriente de aceite de la de agua y de la de gas. Es muy importante separar el agua de la muestra para que no interfiera con la lectura, esto se puede evitar si se coloca un separador en la cabeza del pozo y con esto evitar que la corriente de fluido que se va a muestrear se "contamine" a lo largo de la línea de descarga, esto es muy empleado principalmente en pozos con gastos bajos.

Posteriormente las muestras son enviadas al laboratorio, donde se introducirán en los equipos especiales destinados al conteo de la concentración, para qué por medio del uso de software especial se obtengan gráficas de la concentración de la muestra, y posteriormente se construya la curva final del respuesta donde, con todas las muestras analizadas, se tenga el comportamiento final del fluido y resultados de la prueba.

4.1.5 Equipos de detección y medición de radioactividad

Gracias al avance de la tecnología y de los equipos de cómputo es, posible tener aparatos que pueden detectar y contabilizar las emisiones de los diferentes tipos de energía, que producen los materiales radioactivos. Estos instrumentos proporcionan datos del número de núcleos que decaen por unidad de tiempo en una muestra con material radioactivo y se tiene también el tipo de energía de las radiaciones absorbidas por el detector.

La eficiencia en el registro no es del 100%, pero se tienen mediciones bastante confiables para efectos de detección y medición de las muestras recolectadas en campo. Como se mencionó, se tienen diferentes tipos de energía de emisión de acuerdo al tipo de material radioactivo que se esté empleando, es por esto que se tiene también diferentes tipos de detectores de acuerdo a las razones antes mencionadas.

Los diferentes detectores de radioactividad están basados en los tres principios siguientes:

- Recolección de iones producidos cuando las radiaciones atraviesan un gas
- Comportamiento de materiales semiconductores de corriente al ser atravesados por radiaciones
- Transformación en pulsos de electricidad de la fosforescencia producida, cuando las radiaciones son absorbidas por materiales especiales.

El conocimiento de las técnicas adecuadas para detectar las radiaciones, permite obtener una buena medida de su número de cuentas por unidad de tiempo y de su energía.

4.1.5.1 Detector de centelleo líquido

El detector de centelleo líquido difiere en su principio de los contadores basados en la recolección de iones. Los detectores de centelleo permiten efectuar mediciones de la energía de la radiación, debido a que la intensidad del destello luminoso que producen es directamente proporcional a la energía de la radiación, es decir, la medida de altura del pulso en una medida de la energía de la radiación.

El detector de centelleo es un transductor que cambia la energía de una partícula ionizante en destellos de luz. Hoy en día estos destellos de luz son "vistos" electrónicamente con un tubo fotomultiplicador. Los detectores de centelleo gaseosos o líquidos para partículas Alfa o Beta, tienen una eficiencia de detección del 100% como se mencionó anteriormente. Sin embargo para la radiación Gamma tienen una eficiencia de detección menor al 1%.

Debido a lo anterior, se emplean cristales de centelleo sólidos que tienen gran eficiencia para detectar radiación Gamma, como los cristales de yoduro de sodio con trazas de talio, Na(Tl). Los detectores de centelleo producen una intensidad luminosa proporcional a la energía de la partícula, por lo que con una electrónica adecuada es posible obtener el espectro de la radiación.

Dado que el yodo tiene un número atómico alto ($Z=53$) los detectores de Na(Tl) aseguran una importante absorción fotoeléctrica. Además de proporcionar una gran luminosidad por la radiación ionizante recibida y tiempo de decaimiento pequeño, del orden de microsegundos, por estas razones los detectores de Na(Tl) han dominado el campo de la espectroscopía Gamma.

El detector de centelleo líquido presenta indiscutibles ventajas en la detección radiactiva de partículas Beta de baja energía. Este instrumento recolecta y transforma los destellos de luz en impulsos eléctricos por medio de un tubo fotomultiplicador.

El proceso general se considera como una cadena de eventos, en donde la radiación excita las moléculas del solvente, en el cual se transfiere la energía de excitación a las moléculas del fósforo, emitiéndose entonces el centelleo de la luz hacia el tubo o tubos fotomultiplicadores.

4.2 Metodología empleada por el Departamento de Tecnología Nuclear del IMP para el diseño de una prueba de trazadores radioactivos

A continuación se mostrará la información necesaria para el diseño de una prueba de trazadores radioactivos, basada en el método de volumen de hidrocarburos. El orden de presentación es el que normalmente se sigue en el IMP, aunque cabe mencionar que cada campo y cada yacimiento presenta sus particularidades que, si es necesario, se tendrá que considerar para el diseño de dichas pruebas

4.2.1 Información General del Campo

Se mencionan cuáles son los datos necesarios para tener un panorama general del yacimiento y con esto, se procede a realizar el estudio de radiotrazado.

1. Planos transversales a escala del Campo, incluyendo la configuración estructural de cimas, secciones estructurales transversales o cimas, diagramas descendentes del Campo.
2. Coordenadas de los pozos involucrados.
3. Características del yacimiento (litología, tipo de roca, formación productora, área, espesor, etc.).
4. Propiedades PVT del fluido de interés.
5. Estados mecánicos de los pozos, intervalos medios de disparo y las profundidades de los pozos.
6. Historial de producción e inyección.

7. Datos de ingeniería (presiones y temperaturas del yacimiento), y parámetros de las características del fluido para calcular los factores de volumen del aceite.
8. Gasto de inyección programada para el estudio.

Con toda la información general obtenida, analizada y revisada, se calculan las actividades necesarias (cantidad radioactiva) del trazador, para estimar los tiempos de irrupción entre el pozo seleccionado como inyector y los productores, con el propósito de conocer el comportamiento del aceite y agua de inyección.

4.2.2 Evaluación y selección del trazador

Para seleccionar el trazador ideal se deben conocer las características geológicas del yacimiento como son la roca, tipo de porosidad, tipo de formación productora, tipo del yacimiento (sea bajosaturado o saturado, etc.).

1.1 Efectuar una revisión de los planos de referencia para determinar:

- Profundidad de contacto agua-aceite.
- Profundidad de contacto aceite-gas.
- El espesor del yacimiento en metros totales.
- Las coordenadas de la ubicación de los pozos
- Las distancias entre todos los pozos.

Estos parámetros son de utilidad para seleccionar la mejor opción del pozo inyector.

1. Para el estudio del área, se considera un círculo que abarque a todos los pozos productores, este círculo es llamado radio de investigación al cual se le calcula el volumen de hidrocarburos del yacimiento.

2. Para conocer las características del yacimiento es necesario realizar una revisión de los siguientes parámetros:

- Porosidad promedio (ϕ), en %
- Saturación de aceite (S_o), en %
- Saturación de agua (S_w), en %
- Saturación de gas (S_g), en %
- Permeabilidad promedio (K), en mDarcys
- Presión actual del bloque, en Kg/cm^2
- Temperatura del bloque, en $^{\circ}\text{C}$

3. Revisar los resultados del análisis PVT del fluido y considerar los valores calculados con los parámetros del punto 1.3, del cual se obtienen los siguientes datos:

- Presión de saturación, en kg/cm^2 .
- Presión de Rocío (Yacimientos de Gas y Condensado), en kg/cm^2 .
- Densidad del aceite, en $^{\circ}\text{API}$.
- Viscosidad del aceite, en cp.
- Relación de solubilidad (R_s), en ft^3/bl_o .
- Factores de volumen de aceite, gas, (B_o , B_g) a presión de saturación.

4.2.3 Selección de los pozos

Para seleccionar el pozo inyector de acuerdo a la ubicación y a las distancias calculadas entre los pozos observados o los testigos, es necesario llevar a cabo una revisión del estado mecánico actual de los pozos involucrados; una vez seleccionado el pozo inyector se verificará que cuente con su sistema de inyección continua.

Actividades que se recomiendan realizar antes de la selección del pozo:

1. Efectuar una revisión de los aparejos de los pozos mediante los diagramas de estados mecánicos para determinar la longitud de la tubería de producción y detectar anomalías (fractura o rompimiento en la tubería de revestimiento, tubería de producción sellada, zonas de admisión cerradas, etc.).
2. Calcular la cantidad necesaria de fluido para desplazamiento adecuando el trazador, considerando el cálculo de volumen de la tubería de producción y del agujero hasta la profundidad total del pozo.
3. Realizar los diagramas de los planos señalando las áreas de interés para realizar el estudio. Para crear los diseños se efectúan en las áreas de interés con base a los planos originales.

4.2.4 Inyección con fluido agua

1. Con las características del yacimiento y la información de producción de los pozos, se determina la cantidad de agua producida (Q_{wp} , en barriles por día) con respecto al porcentaje de agua producida. Por ejemplo:

Pozo	Intervalos	Distancia al pozo inyector	Q_o Bruto (BPD)	Q_o Neto (BPD)	Q_{wp} (BPD)
Pozo productor	mbMR	En metros	Barriles de aceite	Barriles de aceite	Barriles de agua

Con la cantidad de la ΣQ_{wp} en el total de los pozos que producen agua se estima que sería la cantidad necesaria para inyectar el fluido agua Q_{wp} .

2. Con el espesor del yacimiento, distancia media entre el pozo inyector y los productores, porosidad promedio, saturación de agua, aceite y/o gas, se calculan los siguientes parámetros:

- Volumen total de la roca (V_r), en m^3
- Volumen total de poros (V_p), en m^3
- Volumen promedio de inyección de agua por día (Q_{wi}).

3. Para estimar los tiempos de tránsito (T_t) entre el pozo inyector y los pozos productores considerando un volumen de poros calculado y el gasto de agua total producida por día, se obtiene el tiempo de tránsito entre un número determinado de pozos observadores o testigos.

$$T_t = \frac{V_p}{Q_{wp} \times P_n} \quad (\text{Días}) \quad (4.1)$$

4. Determinación del tiempo que tarda en pasar el trazador por un pozo productor, (T_t), con respecto al tiempo de tránsito calculado, se divide entre cuatro (4) el tiempo total.

5. La detección de la Actividad Mínima Inyectable (AMI) del trazador, depende de la Actividad Mínima Detectable (AMD) del Contador de Centelleo Líquido, que es evaluado con muestras patrón de agua de yacimiento y la eficiencia propia del equipo de detección de emisores Beta. Con estos parámetros se calcula de forma preliminar la AMI del trazador seleccionado para el estudio con la siguiente ecuación:

$$AMI = Q_{wp} \times T_t \times AMD \quad (4.2)$$

6. La cantidad de AMI calculada se debe considerar 3 ó 4 veces para asegurar el éxito considerando que la vida media del trazador no decaiga antes del término del estudio.

7. La cantidad requerida del trazador para la prueba del estudio con inyección de agua se determina, considerando la corrección por decaimiento isotópico en cuestión, con respecto a la duración del estudio referido en el tiempo de tránsito.

8. Una vez determinada la cantidad real a inyectar en el pozo, se debe realizar un análisis de costo, adquisición y tiempo de entrega para cumplir con las normas de Seguridad Radiológica, ante la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

4.2.5. Inyección con fluido aceite

1. Con las características de yacimiento e información de producción de los pozos se utilizan las Correlaciones de Standing, Vázquez y Lasater, con el fin de calcular el volumen de roca con hidrocarburos (V_{rhc}), que será la base preliminar de los cálculos para determinar la cantidad de trazador como Isótopo-Aromático.

2. Con las correlaciones de Standing, Vázquez y Lasater y el aporte de los datos de cómputo se puede obtener por estimación, los siguientes parámetros:

- Volumen de roca con hidrocarburos, V_{rhc} .
- El factor volumétrico del aceite, B_o .
- La relación de solubilidad, R_s .
- El volumen de aceite en el yacimiento, N_o .
- El tamaño del área de investigación, A

3. En los cálculos de Correlaciones, los principales datos a obtener mediante los análisis PVT son:

- Presión de saturación, en Kg/cm^2 .
- Relación de solubilidad en m^3/m^3 obtenido en el separador 1ª etapa.
- Parámetros de densidad relativa del aceite y gas.

Además se pueden obtener datos de información proveniente de otras fuentes (pruebas de variación de presión), que son útiles para el estudio de radiotrazado:

- Presión de fondo, en Kg/cm^2 .
- Temperatura del yacimiento, en $^{\circ}\text{C}$
- Presión de yacimiento, en Kg/cm^2 .

Estos parámetros deben ser representativos del Campo en general.

4. Dependiendo del tipo de comportamiento del aceite en el yacimiento, se aplican las Correlaciones de Standing, Vázquez y Lasater. Se realiza una comparación entre los valores, para determinar si en la Correlación se asemejan a los resultados del análisis PVT obtenidos en el laboratorio, con la Correlación seleccionada se realizan los cálculos correspondientes a:

- V_{rhc}
- N_o
- B_o
- R_s
- P_b

5. Con los valores de V_{rhc} y N_o (volumen de roca y volumen de aceite contenido en el yacimiento respectivamente) obtenidos, se puede seleccionar el trazador para marcar el aceite que sea compatible con el fluido y realizar cálculos para evaluar la sensibilidad analítica de los equipos de centelleo líquido, con el diseño de concentración nominal de trazador con un factor de seguridad como el número de veces de la Actividad Mínima Detectable (AMD).

6. El factor de seguridad (F_s), es un parámetro que asegura que la detección en la muestra de aceite sea exitosa si la irrupción ocurre rápidamente, siendo aplicado con los siguientes parámetros:

- La AMD calculada en base al volumen de la muestra contada en el equipo de centelleo.
- La AMD calculada por cada litro de aceite en pCi/lit.
- La concentración del trazador aromático en el aceite basado en los límites de Concentración Máxima Permisible (MPC) para cada elemento en la concentración del aceite, por lo que la concentración estará dada en pCi/lit-acite combustión.
- El calculo del F_s , es igual a:

$$F_s = \frac{\text{Concentración del trazador aromático en el aceite}}{\text{AMD de la muestra de aceite}} \quad (4.3)$$

Se obtiene F_s con rangos entre 20-80 veces de la AMD del trazador inyectado.

7. La cantidad de trazador se diseña como el aceite total marcado en el lugar del área de investigación por la concentración deseada en el aceite (AMD).

$$AMI = N_o * AMD , (Ci) \quad (4.4)$$

Con este cálculo teórico se puede corroborar con los cálculos aplicados en los parámetros de yacimiento, que ayudará a estimar la cantidad de cada pozo que es necesario obtener los μCi de trazador, de acuerdo a sus distancias y propiedades del yacimiento, tales propiedades son las siguientes:

- Radio del agujero del pozo productor
- Viscosidad del aceite
- γ = constante de Euler
- CA, valor del factor del círculo con un pozo en el centro
- Valores de Skin, S (0-10)
- Permeabilidad, K

Con estas propiedades se puede calcular Q_o que es la producción del pozo en $m^3/día$ que obtendremos el tiempo de tránsito estimado del pozo y posteriormente la cantidad de AMI de cada pozo y con la suma de todas las AMI de cada pozo, nos dará la cantidad de trazador requerido para marcar el volumen total de aceite en el yacimiento.

8. Con el factor de seguridad (F_s), podemos calcular la cantidad real para el estudio, a partir de la AMI total calculada:

$$\text{Cantidad del trazador real} = AMI * F_s \quad (4.5)$$

9. Con base en la cantidad de trazador obtenida, dependiendo de la vida media del trazador seleccionado, del análisis del costo, de la adquisición y del tiempo de entrega del mismo trazador, se harán las gestiones pertinentes ante la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) con base a las normas de Seguridad Radiológicas para todo lo relacionado a cualquier material radiactivo.

4.2.6 Campos con inyección de trazadores gaseosos (aceite/gas)

Para realizar el diseño de prueba, de la misma manera que para la inyección de agua o aceite, se debe conocer las necesidades y problemas que enfrenta el cliente para obtener el conocimiento del comportamiento del aceite y gas, lo primero es realizar la recopilación de información del campo, sobre la producción de aceite y gas fluente en los pozos productores.

Los parámetros adicionales que se tendrían que conocer en esta etapa, es decir para yacimientos gaseosos donde se aplicará un trazador gas, serían los valores de compresibilidad de dicho gas, un análisis cromatográfico (si es posible realizarlo), densidad, gravedad específica, etc., además de los datos sobre los componentes de la mezcla que pudiera encontrarse en el yacimiento.

También en el diseño de la prueba de trazadores, se tienen dos componentes, la parte del trazador y la parte analítica. Los componentes del trazador dependen de las características de cada pozo, se estima la concentración y se tiene en cuenta la actividad del elemento radiactivo, se consideran las regulaciones en su uso y aplicación y el plan a seguir en la inyección del trazador.

La parte analítica incluye partes como el análisis de la estrategia de inyección, una calendarización de la frecuencia de muestreo y la determinación de los límites de detección de los materiales radioactivos.

CAPÍTULO 5

Ejemplo Campo Girdaldas

5.1 Secuencia de una prueba de inyección de trazadores radioactivos

En este capítulo se ilustra el procedimiento efectuado en el proyecto del estudio de radiotrazado por parte del departamento de Tecnología Nuclear del IMP, aplicado en el Campo Girdaldas. El Activo Muspac de PEMEX, solicitó al IMP efectuar un estudio de radiotrazado con el fin de conocer la trayectoria de flujo de los fluidos que se encuentran en el yacimiento.

El objetivo de la inyección de trazadores radioactivos en el Campo Girdaldas es, conocer la dirección preferencial de flujo de algunos pozos. Debido a la invasión de dichos pozos; se pretende saber si el agua que se está produciendo es agua del empuje hidráulico del propio yacimiento, o si es agua proveniente de los pozos inyectoros.

Durante la inyección del día 3 de septiembre, estuvo presente personal de PEMEX del Activo Muspac del área de yacimientos. Actualmente, en el campo se tienen varios pozos invadidos de agua y algunos pozos ya están cerrados a producción, otros más se tienen ya desde hace algunos años como pozos inyectoros y se está reinyectando el agua congénita del yacimiento, ya que por el valor de la salinidad del agua producida y por normas ecológicas, no se permite derramar dicha agua en los terrenos superficiales.

A continuación se mencionan algunos de los datos necesarios que se deberán de tener presentes para proceder a la inyección de los trazadores radioactivos. También se muestra paso a paso la secuencia de inyección que se realizó el día 3 de septiembre de 2001 en el Campo Girdaldas, específicamente en el pozo Girdaldas-74.

Esta forma de aplicación de trazadores radioactivos corresponde al Departamento de Tecnología Nuclear del Instituto Mexicano del Petróleo que se encuentra en la ciudad de Villahermosa, Tabasco.

5.1.1 Campo Girdaldas

El campo Girdaldas es un yacimiento productor de gas y condensado, actualmente presenta un problema muy común en los yacimientos, como es el avance del contacto agua-aceite y ya se tienen algunos pozos invadidos de agua y otros más que, debido a este problema, ya han sido cerrados a producción.

La información disponible del Campo Girdaldas es la siguiente:

Área del yacimiento: 33.5 Km²

Litología: Carbonatos

Formación productora: K.M. (Cretácico Medio)

Tipo de yacimiento: Gas y condensado

Densidad: 38° API

Profundidad media: 4627 m.b.N.M

Contacto agua-aceite o agua-gas: 4760 m.b.N.M

Temperatura del yacimiento: 134° C

RGA actual: 5413 m³/m³

Porcentaje de CO₂: 2.77%

Porcentaje de H₂S: 1.66%

Fracción de agua: 23%

Salinidad del agua: 57000 ppm

INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
 DELEGACIÓN REGIONAL ZONA SUR
 EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN



CIMA CRETÁCICO MEDIO DEL CAMPO GIRALDAS

ETAPAS DE MUESTREO

ÁREA 'I'
 POZOS: 12, 22, 62, 72 y 126.

ÁREA 'II'
 POZOS: 2, 4, 14, 16 y 116.

ÁREA 'III'
 POZOS: 6, 22, 24 y 26-6.

POZOS QUE SE PODRIAN
 MONITOREAR: 24 y 26.

SIMBOLOGIA

- POZO PRODUCTOR DE GAS Y CONDENSADO
- POZO CERRADO
- POZO PRODUCTOR ENVASADO DE AGUA
- POZO TAPADO POR IMPRODUCTIVO
- POZO INYECTOR

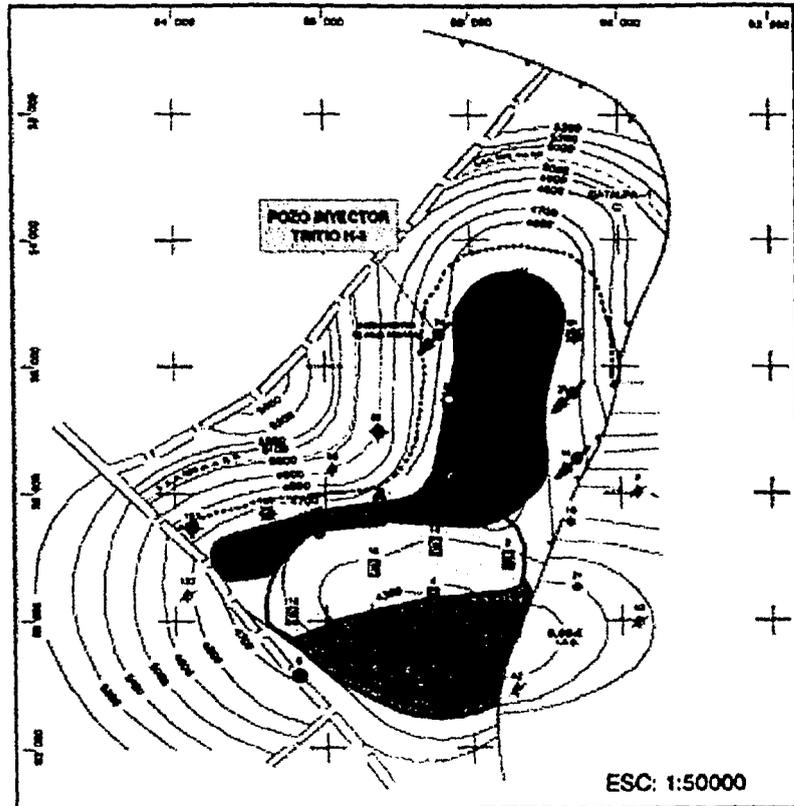


Fig. 5.1 Plano de localización del Campo Girdaldas

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Datos del yacimiento:

Volumen total de roca (área de interés del estudio): 7145.09 MMm³

Volumen total de poros (área de interés del estudio): 478.591 MMm³

Espesor del yacimiento (área de interés del estudio): 184.53 m

Porosidad promedio del campo: 6.7%

Saturación de agua (Sw): 14.7%

Saturación de aceite (So): 15.3%

Saturación de gas (Sg): 70%

Permeabilidad promedio: 1.451 md

Presión del yacimiento: 849 Kg/cm² (inicial); 300 Kg/cm² (actual)

Datos de producción:

Número de pozos perforados: 35

Número de pozos productores: 15

Producción diaria de aceite: 512 m³

Producción diaria de gas: 90 MMPCD

5.1.2 Desarrollo de la prueba de inyección en el Campo Girdaldas

La inyección se preparó para el día 3 de septiembre de 2001 en el pozo número 74 del campo Girdaldas. Se programó, en una primera fase, la inyección de *Tritio* en un pozo que ya tenía casi 5 años de ser pozo inyector de agua residual, y en una segunda fase se tenía programada la inyección de yodo-125, para el día 12 de septiembre de 2001 en otro pozo del mismo Campo.

5.1.3 Determinación de la actividad de trazador necesaria para la inyección en el pozo Girdaldas-74. Activo Muspac

Datos de ingeniería:

Vr = Volumen total de roca (área de interés del estudio) : 7145.09 MMm³
Vp = Volumen total de poros (área de interés del estudio) : 478.591 MMm³
r = Distancia media entre el pozo inyector y pozos productores de aceite: 3282 m
 θ = Porosidad promedio del campo: 6.7 %
Sw = Saturación de agua: 14.7 %
So = Saturación de aceite: 15.3 %
Sg = Saturación de gas: 70.0 %
Kp = Permeabilidad promedio: 1.451 md
Np = Número de pozos productores testigos: 13
Qwi = Volumen promedio de inyección de agua por día: 91 BPD
Qwp = Gasto de agua total producida por día: 1215 BDP = 193.18 m³
Producción de aceite: 512 m³
Producción diaria de gas: 90 MMPCD

Propiedades del trazador Tritio:

Forma química: Agua tritiada
Vida media: Tm = 12.3 años
Energía beta: 18.5 KeV
Abundancia isotópica: 100%

Cálculo de la Actividad Mínima Detectable (AMD):

La Actividad Mínima Detectable de los analizadores de Conteo de Bajo Nivel se basan en los siguientes parámetros, para obtener el valor mínimo detectable para la detección de las partículas de la radiación Beta del isótopo Tritio:

t = Tiempo de conteo: 120 minutos por muestra

B = Fondo: 15 cpm (cuentas por minuto)

E = Eficiencia del equipo de centelleo líquido Quantulus 1220: 68 %

K = Factor de confianza estadístico: 3

Ab = Abundancia isotópica del Tritio : 100 %

Ci = Curie: 2.22×10^{12} dpm (desintegraciones por minuto)

La AMD está determinada por la siguiente fórmula de Schönhofer para la detección del límite bajo del conteo del tritio:

$$\text{AMD} = [16.7 \times K \times \text{Raíz de } (B) / E \times V \times \text{Raíz de } (t) \times 2.22 \times 10^{12} \text{ dpm} / \text{Ci}] (Ab)$$

Unidades de AMD = Ci/ml

Por lo tanto, la AMD es igual a 1.172×10^{-10} Ci/m³

Cálculos:

Estimación del volumen de poros con abundancia isotópica (Vp°)

Basado en los valores de Vp del área de interés y Sw:

$$Vp^{\circ} = Vp \times (1 - Sw) / Ab \quad (5.1)$$

$$Vp^{\circ} = 4.082 \text{ MMm}^3$$

Estimación de tiempo de tránsito (T_t)

Estimación de tiempo de tránsito entre pozo inyector y pozos productores:

$$T_t = V_p^0 / Q_{wp} \times N_p \quad (5.2)$$

$$T_t = 1625.42 \text{ días}$$

Determinación del tiempo del fluido (T_f)

Tiempo que tarda en pasar el trazador por un pozo más lejano al inyector:

$$T_f = \frac{1}{4} (T_t) \quad (5.3)$$

$$T_f = 406.35 \text{ días}$$

Actividad mínima inyectable (AMI)

Para el tritio:

$$AMI = Q_{wp} \times T_f \times AMD \quad (5.4)$$

$$AMI = 9.20 \text{ Curies}$$

AMI con margen de seguridad (AMIs)

Se inyectará el triple de la AMI calculada:

$$AMIs = 3 \times AMI \quad (5.5)$$

$$AMIs = 27.60 \text{ Curies}$$

AMIs corregida por decaimiento (AMIs_c)

Actividad corregida por decaimiento para la inyección considerando el tiempo de fluido de 406.35 días y de la vida media del trazador Tritio:

$$AMIs_c = AMIs / e^{-\ln 2 / T_m \times T_f} \quad (5.6)$$

$$AMIs_c = 29.38 \text{ Curies.}$$

Cantidad de trazador calculada

Para el estudio de radiotrazado del Campo Girdaldas, la cantidad necesaria para la inyección en el pozo Girdaldas-74 será de 30 Curies, suficiente para tener una respuesta satisfactoria en el estudio.

5.2 Arribo al pozo Girdaldas-74

Al llegar al pozo de inmediato se informó que se debía usar el equipo de seguridad, que consiste en botas, ropa especial, mascarilla contra gases, guantes y anteojos especiales para proteger la vista. El equipo se usó, en el área del pozo y durante el tiempo en que se llevó a cabo la prueba de inyección. La Figura 5.2, muestra el equipo que se debe portar durante la realización de dicha prueba.

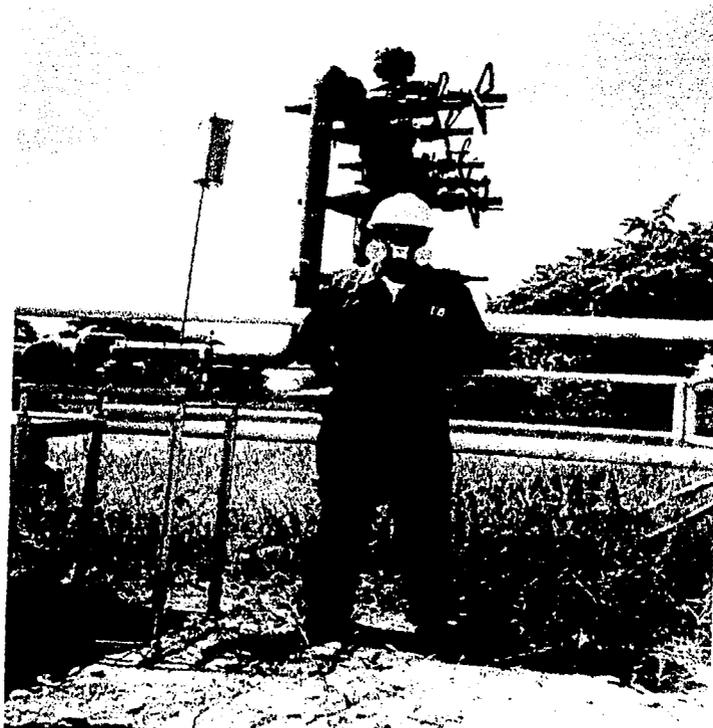


Fig. 5.2 Equipo de seguridad empleado durante la inyección de trazadores radioactivos.

5.2 Arribo al pozo Giraldas-74

Al llegar al pozo de inmediato se informó que se debía usar el equipo de seguridad, que consiste en botas, ropa especial, mascarilla contra gases, guantes y anteojos especiales para proteger la vista. El equipo se usó, en el área del pozo y durante el tiempo en que se llevó a cabo la prueba de inyección. La Figura 5.2, muestra el equipo que se debe portar durante la realización de dicha prueba.

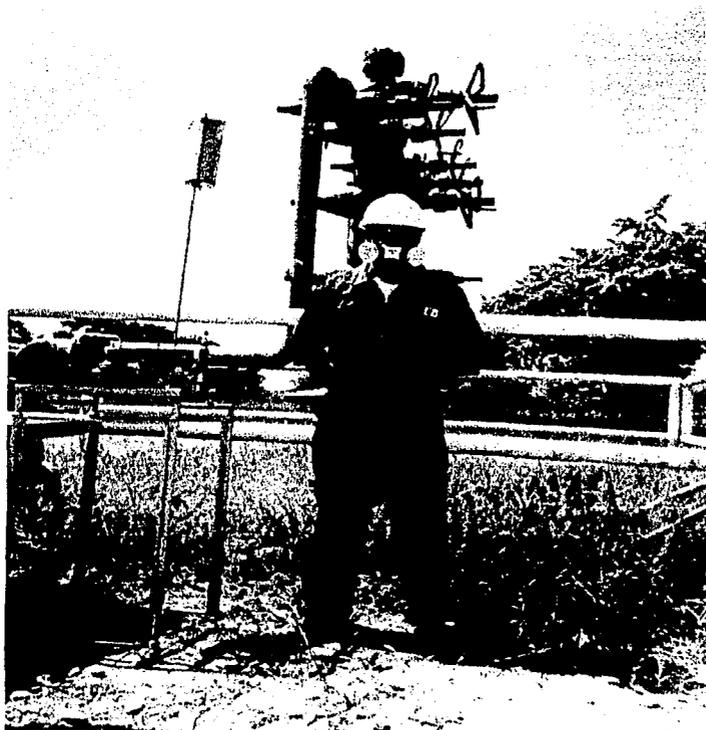


Fig. 5.2 Equipo de seguridad empleado durante la inyección de trazadores radioactivos.

Posteriormente se procedió al armado del equipo de inyección del radiotrazador y aquí se mostrará la secuencia de preparación del trazador para la inyección en el pozo Girdaldas-74.

5.3.1 Preparación e inyección de trazadores radioactivos

1. **Visita previa de campo.** Esta visita se realiza unos días antes de efectuar la inyección y es principalmente para revisar las condiciones físicas del pozo, es decir las instalaciones superficiales y el estado en que se encuentra el árbol de navidad, si es que tiene árbol completo o si es medio árbol, además se asegura también de que no existan problemas de acceso a los pozos que se emplearán como inyectoros y a los que serán los productores para la toma de muestras.
2. **Visita al pozo.** Llegada al pozo para efectuar la inyección llevando el material de radiotrazado que se inyectará al pozo, con todas la medidas de seguridad en el manejo de dichos materiales.
3. **Presencia de PEMEX.** Si no hay personal de PEMEX no se "toca" nada de la estructura del pozo, se podrá montar el equipo que se va a emplear para la inyección, pero no se trabajará en las instalaciones del pozo hasta que no haya presencia y autorización de personal de PEMEX para efectuar la inyección.
4. **Armado del equipo de inyección.** Se procede a preparar todos y cada uno de los elementos que intervendrán en la prueba de inyección, dependiendo de las condiciones de la inyección se harán los arreglos necesarios.

Para este caso se consideró desde el alineamiento de la camioneta de transporte, que servirá de apoyo, hasta la colocación de viales contenedores de los fluidos a inyectar, pasando por las conexiones al pozo y la colocación de una bomba por si es necesaria la aplicación de presión para inyectar el trazador. Ver Fig. 5.3.

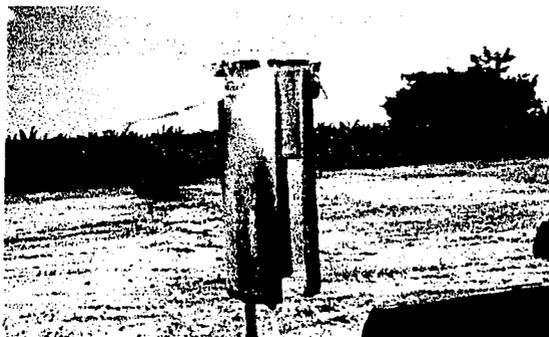


Fig. 5.3 Vial contenedor para la dilución e inyección del trazador

5. Levantamiento previo de radiación. Este se realiza antes de la inyección y es para establecer un nivel inicial (si es que existe) de radiación en las instalaciones superficiales del pozo, específicamente en las tuberías y conexiones por donde va a fluir el trazador durante la inyección. Ver Fig. 5.4.



Fig. 5.4 Levantamiento inicial de niveles de radiación.

6. Prueba de hermeticidad. Ésta, se realiza en las conexiones que se realizaron para la inyección del trazador y al hacer esto, se asegura no tener fugas que pudieran derivar en una falla del trazador inyectado o en una fuga al exterior que provoque problemas de contaminación y de salud al personal presente o al medio ambiente.
7. Condiciones de inyección. Aquí se realizan las ultimas revisiones del trazador que se va a emplear, así como también de las cantidades a inyectar. Se calcula el tiempo que durará la inyección de acuerdo a el diámetro de la válvula por donde se inyectará, esto es, con la apertura de la válvula para la admisión de manera controlada el flujo del trazador.
8. Preparación del trazador. Se procede a desempacar la cápsula que contiene el trazador radioactivo, la cual viene envuelta en una franela especial que la protege de la posible emisión de radioactividad y es empacada en un contenedor de plástico especial que protege y aísla el material de una posible fuga. Ver Fig. 5.5.



Fig. 5.5 Desempacamiento y preparación y del trazador radioactivo.

9. Dilución del trazador. Con el equipo de seguridad colocado (guantes, mascarilla, ropa especial, anteojos, etc.) se procede a diluir el trazador radioactivo en el volumen de agua que se calculó previamente, y que está relacionado directamente con lo que se mencionó respecto al diámetro de la válvula de inyección. Para este caso el trazador radioactivo que se diluyó fue tritio y posteriormente lodo 131. Ver Fig. 5.6.



Fig. 5.6 Dilución del trazador en vial contenedor para inyección.

10. Dosificación. Se procede a dosificar el trazador radioactivo, esto es propiamente la inyección del material trazador ya diluido en agua al interior del pozo. Ver Fig. 5.7.



Fig. 5.7 Dosificación del trazador.

En realidad el tiempo de inyección del trazador radioactivo para esta prueba fue aproximadamente de 15 a 20 minutos. Esto debido al volumen del trazador (aproximadamente 20 ml y con una concentración de 30 Ci) diluido en un litro de agua. Debido a que el pozo es inyector se tiene una "succión" que hace que el fluido marcado sea absorbido rápidamente y enviado al fondo del pozo.

11. Monitoreo de radioactividad. Durante la inyección del trazador se monitorea constantemente la radioactividad con un medidor Geiger Muller. Esto se hace a través de la línea que va del vial contenedor al tubo que tiene la válvula en el pozo.

Esto se hace repetidamente para asegurar que el trazador radioactivo va fluyendo al interior del pozo y al paso del tiempo, las lecturas de radioactividad van descendiendo, con esto se asegura que el paso del fluido marcado ya está casi por completo en el interior del pozo. Ver Fig. 5.8.

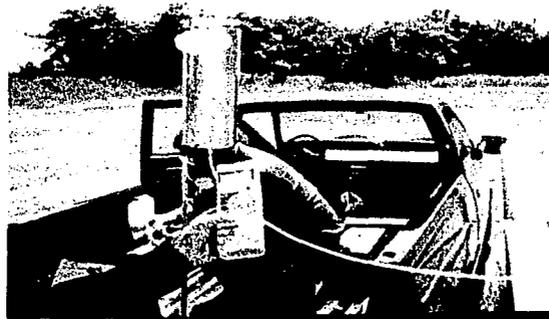


Fig. 5.8 Monitoreo del radiotrazador en la línea de inyección.

12. Lavado del equipo. Al término de la dosificación del trazador, se procede a realizar por lo menos tres lavados del equipo que estuvo en contacto con el material radioactivo.

Se le aplica una solución descontaminadora que se llama "count off" y dicha solución sirve para la absorción de emisiones de rayos Gamma o Beta sobrantes desde el vial contenedor, pasando por la manguera de inyección y llegando a las válvulas de inyección. Ver Fig. 5.9.



Fig. 5.9 Aplicación de solución descontaminadora.

13. Medición de radiación final. Al cabo del tercer lavado, se mide la radiación que pudiera resultar en el equipo empleado en la inyección y con esto, se asegura que el material empleado esté libre de radioactividad. Igualmente en las instalaciones superficiales del pozo se mide la radioactividad que pudiera quedar, y esto es también para asegurar que el bache trazado se ha ido al fondo del pozo y que no se "regreso" en ningún momento por la línea de inyección. Ver Fig. 5.10.



Fig. 5.10 Medición de radiación al término de la inyección.

14. Desmantelamiento del equipo. Se procede a desconectar todo el equipo que se empleó en la prueba de inyección.

15. Desechos radioactivos. Todo el material que estuvo en contacto con el trazador radioactivo es identificado y envuelto en papel, para ser colocado en unas bolsas especiales de desechos radioactivos; nada del material usado se vuelve a emplear, todo se tira en lugares establecidos y designados como bodegas o almacenes de desechos radioactivos.



Fig. 5.11 Recolección de desechos radioactivos.

16. Recomendaciones finales. Se comentan las incidencias de la prueba de inyección, se hacen recomendaciones para no interferir con el desplazamiento del trazador al yacimiento. Para esta prueba, se recomendó que se mantuviera la inyección continua del pozo inyector por dos días para asegurar el desplazamiento del bache trazado, se recomendó no abrir la válvula por donde se inyectó el fluido y así se establecieron acuerdos entre los especialistas del IMP y personal de PEMEX..

5.3 Muestreo

En el campo Girdaldas se realizó la inyección el día 3 de septiembre de 2001 y el día 4 de septiembre de 2001 a las 07:30 ya se estaban realizando los primeros muestreos en los pozos productores.

En la Tabla 5.1, se muestra el calendario de muestreo para el estudio de radiotrazado mostrado en este ejemplo. Dicho calendario de muestreo corresponde a los meses de septiembre y octubre de 2001.

Para el muestreo en los pozos, se emplea el equipo de seguridad necesario para realizar esta operación. El equipo consta de un casco, anteojos, ropa de seguridad y mascarilla contra la emisión de gases. Los pozos que se muestrearon en la primera etapa fueron los pozos:

Girdaldas 72

Girdaldas 12

Girdaldas 32

Girdaldas 52 (*)

(*) No se pudo acceder al pozo destinado a muestreo debido a que el pozo se encontraba con afectación campesina.

Para el muestreo se procede a identificar el pozo. En una de las válvulas del árbol de navidad se coloca un "cuello de ganso" que es una manguera que se adapta a la válvula del árbol, para que se pueda recolectar el aceite que posteriormente se preparará para el conteo e identificación de material radioactivo. Ver Fig. 5.12.



Fig. 5.12 Preparación para tomar la muestra en el pozo Giraldas-72.

Al tener la suficiente cantidad de fluido muestreado (aproximadamente 1 litro) se retira el cuello de ganso y se aísla para su desecho; para cada uno de los pozos de muestreo se emplea un cuello de ganso diferente y nuevo esto, para asegurar que no se contaminen otras muestras. Los botes contenedores se identifican de acuerdo al pozo y se registra la hora del muestreo. También se aseguran las muestras en una caja para el transporte de dichas muestras al laboratorio de "campo". Ver Fig. 5.13.



Fig. 5.13 Recolección de la muestra del pozo giraldas-12

5.4 Preparación de muestras en laboratorio de "campo"

Posterior al muestreo, se procede a obtener un volumen de agua de la muestra del pozo que fue muestreado para, primeramente separar el agua del aceite, eliminar impurezas y tomar los primeros datos del fluido como su densidad, temperatura, salinidad, relación gas-aceite (RGA). Por lo descrito anteriormente, se habla de un laboratorio de "campo" ya que es ahí donde se realiza el análisis radioquímico de las muestras recolectadas.

Para esta prueba de inyección de trazadores radioactivos, el laboratorio que se usó de apoyo para el análisis, antes mencionado, del fluido fue el laboratorio de Cactus. La persona responsable de realizar esta preparación inicial de las muestras fue el Ingeniero Justo del Real quien también labora en el Departamento de Tecnología Nuclear del IMP.

La preparación y separación inicial, se realiza por medio de una centrifugación, después de tener los datos del fluido. Se coloca la muestra en unos tubos California, se selecciona el volumen según la capacidad del tubo y según el volumen deseado de agua para la muestra.

El centrifugado se realiza a 4000 rpm y aproximadamente por 10 minutos y después se extrae el volumen de agua deseado con una jeringa y colocado en los frascos color ámbar para su envío al laboratorio de conteo.

Al darse una separación del agua, del aceite y sedimentos, debido a la densidad de las sustancias y a la fuerza centrífuga, con una jeringa se extrae la cantidad de agua del tubo california para colocar el agua en un frasco especial y de color ámbar que será enviado posteriormente al laboratorio de conteo.

Cabe mencionar que el equipo de seguridad es muy importante para la preparación de la muestra y que además se emplea, para cada una de las muestras equipo desechable para evitar contaminación.

Posteriormente, las muestras se envían al laboratorio en las instalaciones del Departamento de Tecnología Nuclear de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, donde se harán los conteos de radioactividad.

5.5 Análisis de muestras con equipo de centelleo líquido

Aquí se reciben las muestras del laboratorio de campo y se preparan de la siguiente manera:

1. Se reciben las muestras provenientes del laboratorio de campo, éstas vienen envasadas en un frasco color ámbar para evitar que la luz externa, ya sea solar o artificial, produzcan cambios internos y puedan alterar la composición radioquímica de la muestra. Ver Fig. 5.14.



Fig. 5.14 Muestras provenientes de laboratorio de campo.

2. El equipo de seguridad es importante y el personal del laboratorio de Tecnología Nuclear que maneja las muestras recibidas del campo, extrema precauciones ya que en esa etapa del análisis de la muestra no se sabe si la muestra que se está preparando puede contener alguna concentración de radioactividad. Ver Fig. 5.15.

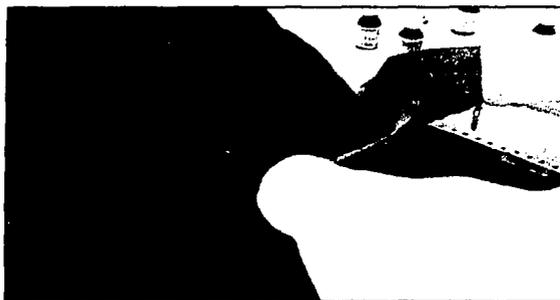


Fig. 5.15 Colocación de guantes protectores.

3. Posteriormente se acondiciona el lugar de trabajo para evitar accidentes, se dispone del mismo número de viales de acuerdo al número de muestras que se hayan obtenido del laboratorio de campo, así como también se tiene cerca un portaviales para la preparación del "cocktel". Ver Fig. 5.16.

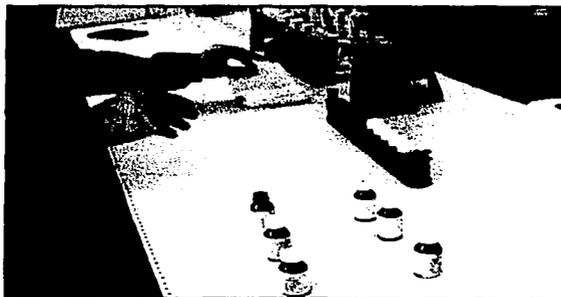


Fig. 5.16 Acondicionamiento del lugar de trabajo para preparación de muestras

Los frascos viales son contenedores especiales que tienen la función de servir como elementos receptores de los fluidos que provienen del laboratorio de campo, así como también de fluidos con los que es preparada la muestra. Son especiales debido a que son fabricados con materiales especiales que no reaccionan químicamente con los fluidos; esto es muy importante para evitar alteraciones en las lecturas de conteo.

Pueden ser de varias formas y a continuación se muestran algunas imágenes de dichos viales especiales para el conteo.

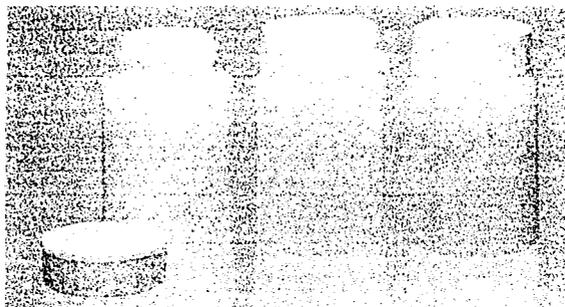


Fig. 5.17 Viales para conteo de polietileno.

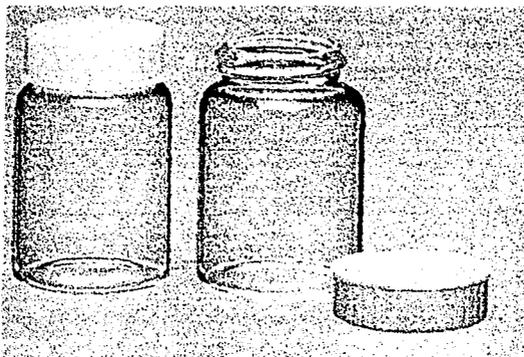


Fig. 5.18 Viales para conteo de vidrio.

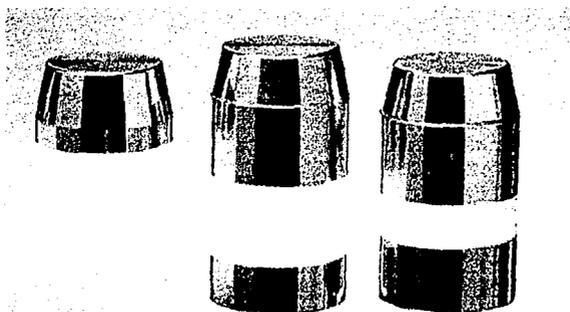


Fig. 5.19 Viales de Copper-teflón

4. Se mide el volumen de fluido que se necesita para el conteo en un frasco vial y se tendrán el mismo número de viales que el número de muestras. Posteriormente se vierte del frasco ámbar a un vial el volumen deseado de agua de la muestra. En este caso fue de 10 ml. Ver Fig. 5.20.



Fig. 5.20 Preparación de la muestra en viales para conteo.

5. Al término de la preparación de las muestras se prepara el "coctel" de las muestras con los viales para posteriormente añadirles el líquido centellador que es un fluido que excitará las moléculas existentes en la muestra y que servirá para el conteo en el equipo.
6. El líquido centellador se le conoce como "Hi-Safe" y se le añade el volumen calculado para el volumen de muestra por medio de una jeringa electrónica o por decantación. Aquí también se emplearon 10 ml de Hi-Safe. Ver Fig. 5.21.



Fig. 5.21 Colocación de "Hi-Safe" a la muestra

7. Al tener las muestras con Hi-Safe se procede a programar el equipo de centelleo líquido. En el laboratorio de Tecnología Nuclear del Instituto Mexicano del Petróleo se cuenta con dos modelos diferentes para el conteo de cantidades de material radioactivo. Los dos equipos se basan en el detector de centelleo líquido. Los modelos son el Wallac 1410 y el Quantulus 1220.

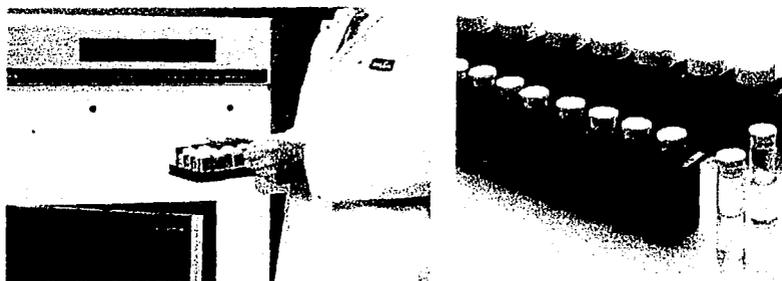


Fig. 5.22 Transporte de muestras a equipo de conteo.

El equipo destinado para el conteo de las muestras que tiene el Laboratorio de Tecnología Nuclear, son el Wallac 1410 y el Quantulus 1220. Estos equipos funcionan bajo el concepto de contadores por centelleo líquido, y van acompañados de un software que es programado de acuerdo a las necesidades de la prueba.

Cuenta también, con monitores especiales de computadora personal (PC's) para tener una visión previa y actual de lo que se va "contando" dentro del equipo, además de una impresora especial que arroja los espectros finales al término del conteo de las muestras. Ver Fig. 5.23 y 5.24.

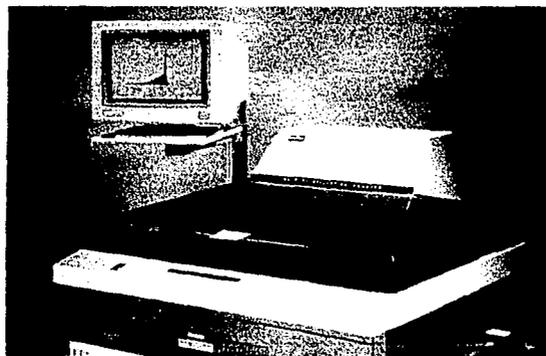


Fig. 5.23 Wallac 1410

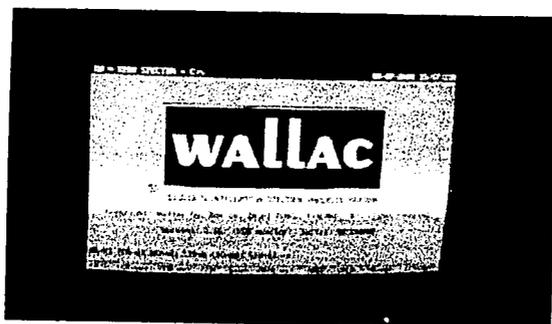


Fig. 5.24 Pantalla de inicio de software del Wallac 1410

Del equipo Quantulus 1220 se tiene lo siguiente:

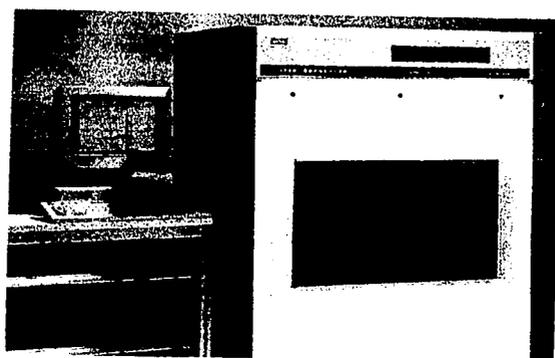


Fig. 5.25 Quantulus 1220

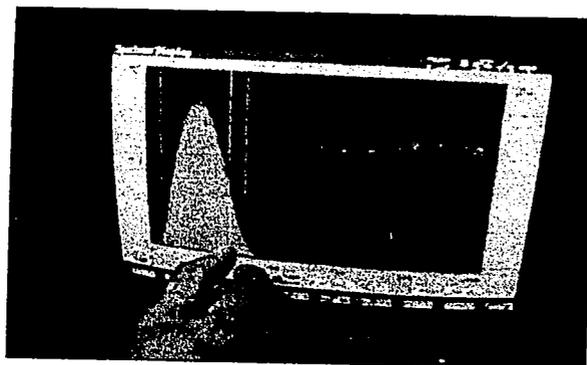


Fig. 5.26 Desplegado del conteo del Quantulus 1220.

- Al cabo del tiempo programando se presentan los resultados del conteo y el equipo imprime una o varias gráficas donde se observan los espectros para cada una de las muestras de acuerdo a su nivel de energía y a las cuentas por minuto.

El equipo Wallac 1410 hace el conteo de varias muestras al mismo tiempo según lo que se programe; realiza el conteo de cuentas por minuto contra tiempo, pero tiene el inconveniente de que no distingue entre los diferentes tipos de emisión de partículas de radiación, esto es, evalúa la muestra de manera total (en cuentas totales) del espectro. Ver Fig. 5.27.

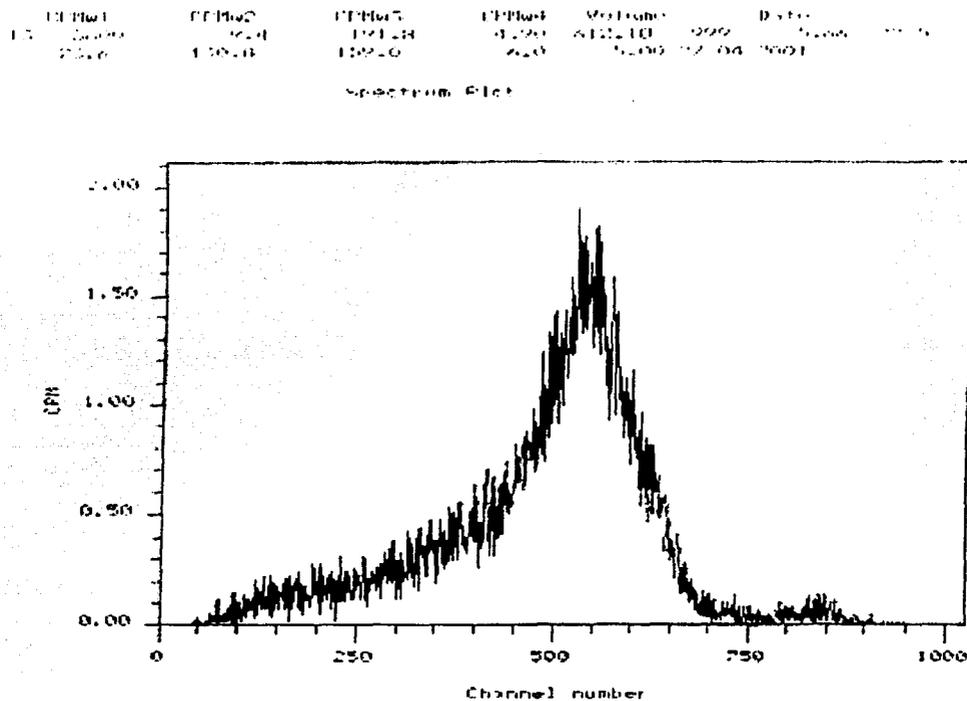


Fig. 5.27 Espectro del equipo Wallac 1410 del conteo de muestras.

Para el Quantulus 1220 se tiene otro tipo de espectro que es más claro al momento de su lectura. Este equipo sí hace la diferencia entre los diferentes tipos de emisiones de partículas, ya sean Alfa, Beta o Gamma. En las gráficas resultantes del conteo se tiene el análisis de la misma muestra para diferentes tiempo, esto se puede ver, ya que el programa permite asignar un color para cada conteo en determinado tiempo. Ver Fig. 5.26.

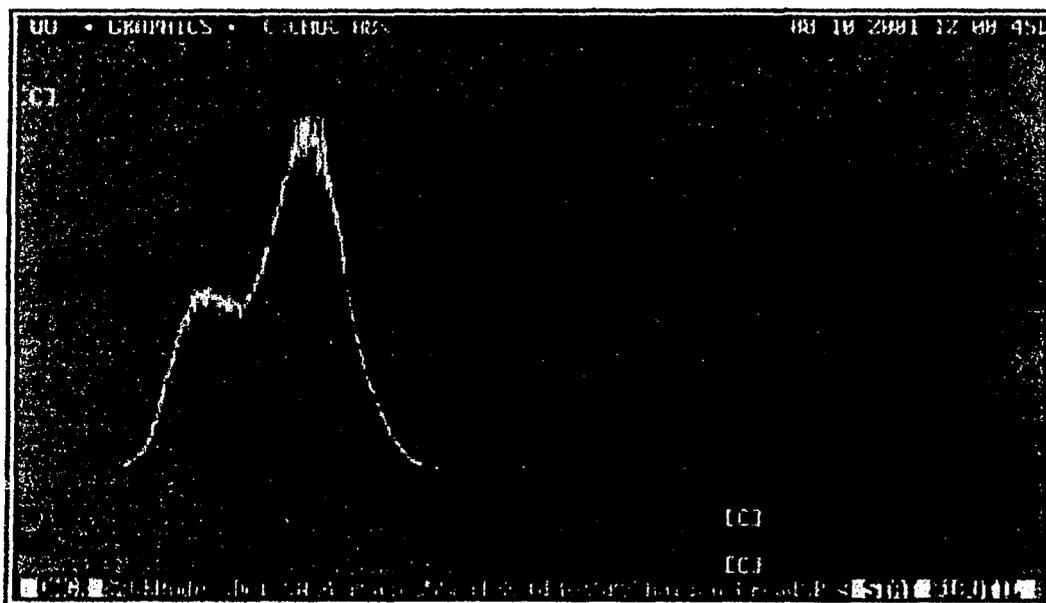


Fig. 5.28 Espectro de conteo del equipo Quantulus 1220.

9. Al término del conteo se identifica la presencia o no de una o más emisiones de radioactividad independientemente del tipo de energía que se trate.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Resultados Preliminares

Antes de proceder al análisis de las muestras, se introduce una muestra del trazador radioactivo puro, así como fue obtenido del proveedor con la finalidad de conocer algunas propiedades y datos que servirán como punto de partida y de comparación para las muestras provenientes del campo. Es importante realizar esta prueba con el trazador puro, y tener el dato de la eficiencia del equipo de centelleo líquido bajo estas circunstancias, ya que se tendrá una curva patrón del comportamiento de dicho trazador, asimismo, se obtendrá el espectro característico del radiotrazador y el nivel de energía en el que se está presentando.

El dato de la eficiencia del equipo es un dato que proporciona el propio mecanismo del aparato en el momento de hacer el conteo de las muestras. Es un dato que de alguna manera ya está dado por el fabricante del equipo y debe de considerarse este factor para el conteo de las muestras. Cuando el equipo de centelleo líquido fija el valor de la eficiencia del equipo al hacer la prueba con el radioisótopo puro, el valor obtenido es el valor máximo de eficiencia para ese radioisótopo, y las muestras que sean analizadas, tendrán un valor de eficiencia del equipo con respecto al valor inicialmente fijado con el radiotrazador puro.

Para efectos de análisis de la prueba es necesario presentar los resultados proporcionados por el personal del laboratorio de Tecnología Nuclear, de tal forma que se obtengan gráficas de concentración Vs. t y de trazador recuperado Vs. t, por pozo y a nivel de Campo.

Una vez realizado el análisis radioquímico de las muestras, es necesario construir una serie de gráficas representativas de la respuesta del trazador, las cuales servirán para analizar e interpretar los primeros resultados de la prueba y además se podrá observar el comportamiento del fluido a lo largo de los días que han transcurrido desde que se inyectó el trazador al yacimiento.

Para la elaboración de las curvas de respuesta, se debe considerar el "fondo natural" y la eficiencia del equipo de medición. El fondo natural es un valor promedio de emisión de radiación medido para todo el yacimiento, antes de la inyección del trazador, con esto, se fija el valor inicial de radiación en el yacimiento de tal manera, que las muestras que tengan una emisión mayor de radioactividad que la del fondo natural contendrá el trazador inyectado, en tanto que las muestras cuya emisión sea menor a la del fondo natural, no representan ninguna contribución del fluido de inyección. Para el Campo Giraldas, el valor de fondo natural es de 16.22 $\mu\text{Ci/ml}$ (360 Cuentas Por Minuto).

Se procede a obtener las gráficas tanto de Cuentas por minuto (*CPM*) Vs. *t*, como la de Desintegraciones por minuto (*DPM*) Vs. *t*. El equipo de centelleo líquido nos arroja los valores de *CPM* de cada una de las muestras analizadas y para tener los valores de *DPM*, sólo se divide el valor de las *CPM* entre el valor de la eficiencia del equipo.

$$DPM = \frac{CPM}{\text{Eficiencia_del_equipo}} \quad (5.7)$$

Los espectros de las primeras muestras analizadas, son revisados y comparados con espectros "patrón" del comportamiento del trazador radioactivo que se empleó en la inyección, se toman los valores de los picos más altos y se va construyendo una curva de estos valores con cada una de las muestras a cierto periodo de tiempo.

Las figuras 5.27 y 5.28 presentan las curvas de *CPM* Vs. *t* y de *DPM* Vs. *t*, respectivamente.

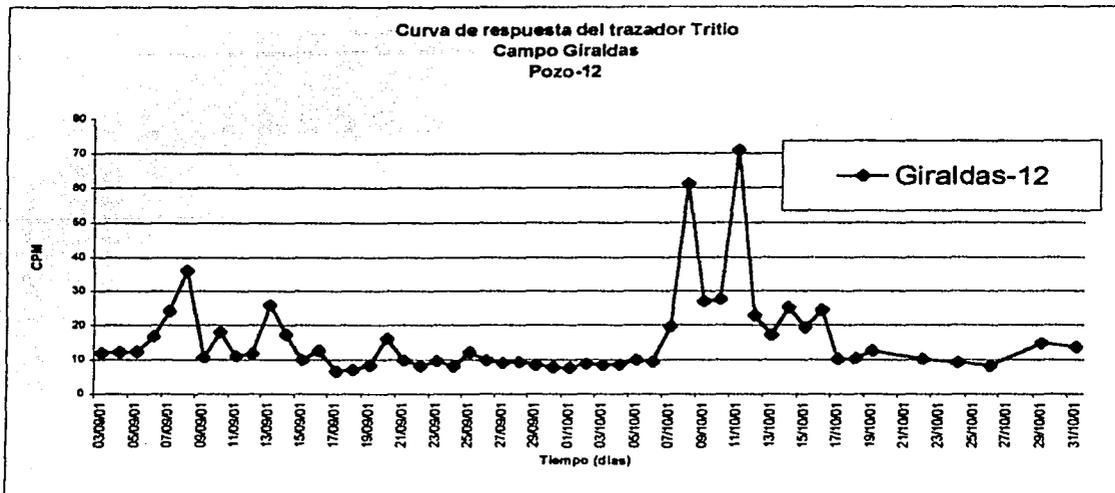


Fig. 5.29. Curva de Conteos por minuto de las muestras del pozo Girdaldas-12.

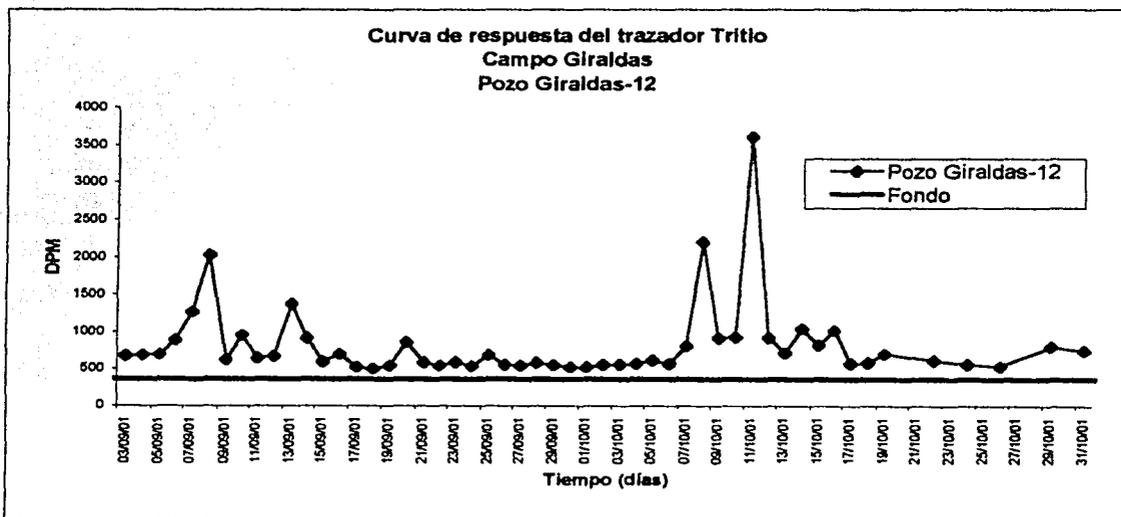


Figura 5.30 Curva de desintegraciones por minuto de las muestras del pozo Girdaldas-12.

Los datos del pozo 12 del Campo Girdaldas se muestran a continuación en la Tabla 5.1. A partir de los datos de conteo y la eficiencia del equipo, columnas **B** y **E**, se obtienen las desintegraciones por minuto, columna **C**. A través del factor de conversión: 1 curie (Ci) = $3.7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones por segundo, considerando que el volumen de la muestra es de 10 ml, se obtiene la concentración del trazador en $\mu\text{Ci/ml}$, columna **D** de la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Datos del pozo Girdaldas-12

A	B	C	D	E	F	G	H
Fecha	CPM	DPM	Concentración $\mu\text{Ci/ml}$	% Eficiencia	Agua producida ($\text{m}^3/\text{día}$)	Trazador recuperado ($\mu\text{Ci}/\text{día}$)	Trazador recuperado (μCi)
03-Sep	11.86	314.59	14.17	3.77	6.8275	96.7502	96.7502
04-Sep	12.13	325.20	14.65	3.73	5.5698	81.5903	178.3406
05-Sep	12.32	332.97	15.00	3.70	6.1088	91.6246	269.9651
06-Sep	16.71	525.47	23.67	3.18	5.0308	119.0785	389.0436
07-Sep	24.12	910.19	41.00	2.65	6.8275	279.9240	668.9677
08-Sep	36.09	1670.8	75.26	2.16	6.8275	513.8565	1182.8242
09-Sep	10.55	263.75	11.88	4.00	6.4681	76.8451	1259.6693
10-Sep	18.09	593.11	26.72	3.05	7.5461	201.6083	1461.2775
11-Sep	11.05	282.61	12.73	3.91	6.4681	82.3397	1543.6172
12-Sep	11.78	310.82	14.00	3.79	6.9353	97.0998	1640.7170
13-Sep	25.88	1014.9	45.72	2.55	5.8213	266.1283	1906.8454
14-Sep	17.25	552.88	24.90	3.12	6.7556	168.2463	2075.0916
15-Sep	9.85	237.92	10.72	4.14	7.9055	84.7251	2159.8168
16-Sep	12.57	343.44	15.47	3.66	10.1693	157.3230	2317.1398
17-Sep	6.61	163.21	7.35	4.05	5.7854	42.5331	2359.6729
18-Sep	6.97	141.67	6.38	4.92	5.4260	34.6254	2394.2982
19-Sep	8.28	183.59	8.27	4.51	4.9589	41.0097	2435.3079
20-Sep	16.15	500.00	22.52	3.23	5.2464	118.1622	2553.4701
21-Sep	9.67	231.34	10.42	4.18	5.2464	54.6712	2608.1413
22-Sep	8.22	181.46	8.17	4.53	4.9589	40.5327	2648.6740
23-Sep	9.58	228.64	10.30	4.19	4.9589	51.0721	2699.7461
24-Sep	7.98	172.73	7.78	4.62	3.4137	26.5603	2726.3064
25-Sep	12.17	327.15	14.74	3.72	4.3121	63.5453	2789.8518
26-Sep	9.77	197.77	8.91	4.94	4.3121	38.4152	2828.2670
27-Sep	8.97	182.32	8.21	4.92	3.4137	28.0349	2856.3019
28-Sep	9.35	220.00	9.91	4.25	2.5513	25.2832	2881.5851
29-Sep	8.45	189.04	8.52	4.47	3.3419	28.4570	2910.0421
30-Sep	7.69	164.32	7.40	4.68	3.4856	25.7991	2935.8412

01-Oct	7.63	162.34	7.31	4.70	7.3665	53.8685	2989.7097
02-Oct	8.72	196.84	8.87	4.43	8.3008	73.6003	3063.3101
03-Oct	8.51	201.66	9.08	4.22	7.8336	71.1583	3134.4684
04-Oct	8.58	207.75	9.36	4.13	7.0431	65.9095	3200.3779
05-Oct	9.87	253.08	11.40	3.90	7.1868	81.9285	3282.3064
06-Oct	9.30	206.21	9.29	4.51	7.9773	74.0985	3356.4049
07-Oct	19.57	445.79	20.08	4.39	7.3108	146.8041	3503.2090
08-Oct	61.15	1841.8	82.97	3.32	3.6029	298.9218	3802.1308
09-Oct	27.08	552.65	24.89	4.90	3.8828	96.6595	3898.7903
10-Oct	27.68	568.38	25.60	4.87	6.7162	171.9522	4070.7426
11-Oct	70.90	3252.2	146.50	2.18	7.1359	1045.4073	5116.1498
12-Oct	22.92	557.66	25.12	4.11	6.0166	151.1371	5267.2869
13-Oct	17.22	355.79	16.03	4.84	7.5907	121.6513	5388.9382
14-Oct	25.17	687.70	30.98	3.66	5.9466	184.2120	5573.1502
15-Oct	19.33	462.44	20.83	4.18	3.9527	82.3373	5655.4874
16-Oct	24.50	660.38	29.75	3.71	3.8478	114.4595	5769.9469
17-Oct	10.12	212.16	9.56	4.77	2.7284	26.0746	5796.0215
18-Oct	10.36	219.96	9.91	4.71	3.2182	31.8859	5827.9074
19-Oct	12.57	343.44	15.47	3.66	2.6235	40.5866	5868.4939
22-Oct	10.23	251.97	11.35	4.06	2.5186	28.5862	5897.0801
24-Oct	9.11	202.00	9.10	4.51	3.0782	28.0082	5925.0883
26-Oct	8.13	178.68	8.05	4.55	2.5885	20.8341	5945.9224
29-Oct	14.79	437.57	19.71	3.38	2.9733	58.6053	6004.5278
31-Oct	13.55	383.85	17.29	3.53	2.7635	47.7827	6052.3105

Como se considera que la concentración es homogénea en toda la producción de agua, para obtener la concentración de trazador por día en el pozo Girdaldas-12, basta con multiplicar la columna **D** por el gasto producido por día, columna **F**. La figura 5.29 muestra la curva de respuesta de trazador en el pozo Girdaldas-12, columna **G** Vs. **t**.

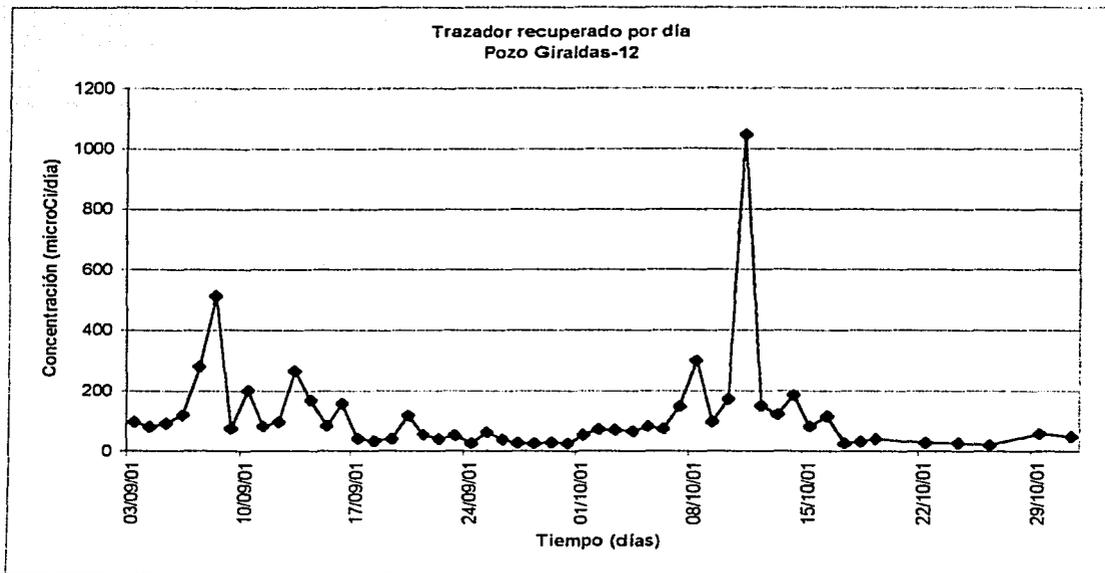


Fig. 5.31. Trazador recuperado por día.

Para conocer la cantidad de trazador recuperado, es muy útil construir una gráfica en la que se muestre la curva acumulativa de trazador del pozo, de tal manera, que permita realizar un balance de materia aproximado, considerando el trazador recuperado en los pozos y la concentración de inyección.

Para la elaboración de la curva de trazador recuperado Vs. tiempo, empleamos la siguiente ecuación:

$$T.R. = \int_0^t Q(t)C(t)dt \quad (5.8)$$

Donde:

T.R = Trazador Recuperado ($\mu\text{Ci}/\text{día}$)

$Q(t)$ = Gasto de agua producida ($\text{m}^3/\text{día}$)

$C(t)$ = Concentración de radiotrazador ($\mu\text{Ci}/\text{m}^3$)

En este caso, el trazador recuperado corresponde a la integral de las columnas F y H de la misma Tabla 5.1. Se integró numéricamente con el método trapezoidal. La figura 5.30 ilustra la curva de trazador recuperado, columna H Vs. t.

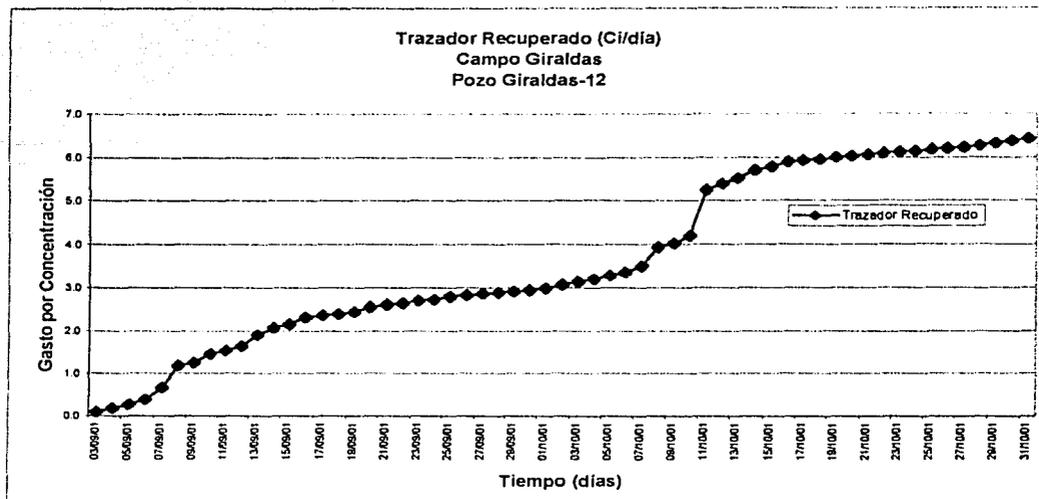


Fig. 5.32 Grafica de Trazador recuperado acumulado por día.

La diferencia entre el trazador recuperado a nivel de campo y la actividad inyectada, correspondería al trazador que permanece en el yacimiento. Para realizar un análisis cuantitativo del comportamiento del trazador durante su viaje en el medio poroso, se requieren de modelos matemáticos que representen, en lo posible, la mayoría de los mecanismos de transporte que ocurren en el medio poroso, tales como adsorción, difusión, convección, ionización, reacciones químicas.

Finalmente para ilustrar el comportamiento de la presencia del trazador en el pozo Girdaldas-12 con relación al agua producida, se presenta la Figura 5.31, en la cual se observa que la concentración del trazador obtenida por día, no mantiene una relación lineal con el gasto de agua, dado que se puede tener un alto gasto de agua con baja concentración de trazador y viceversa.

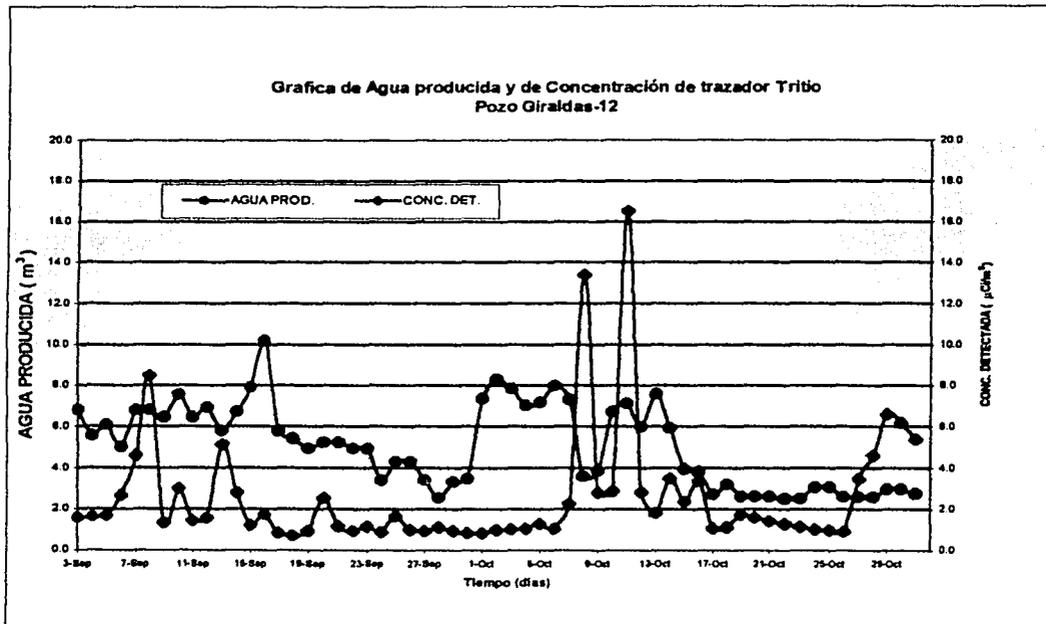


Fig. 5.33 Grafica de Agua producida y de Concentración de trazador Tritio. Pozo Girdaldas-12.

Para el análisis anterior, sólo se utilizarán los datos del pozo Girdaldas-12 y esto debido a que la inyección de trazador se realizó el día 3 de septiembre y dicho pozo fue el primero en el que se detectó la presencia de tritio.

Es importante hacer notar que el proyecto "Estudio de Radiotrazado del Campo Girdas", del IMP se encuentra a tres meses de los cuatro que durará el propio estudio, por lo que faltaría el análisis radioquímico de las posteriores muestras de acuerdo al programa de muestreo para estar en condiciones de analizar e interpretar la prueba de trazadores en el Campo Girdas y con ello evaluar si el agua producida proviene de la formación o corresponde al agua de inyección, que como se mencionó, fue el objetivo del estudio.

CAPÍTULO 6

Conclusiones y Recomendaciones

La metodología del análisis de las pruebas de trazadores, comprende varias líneas de trabajo como son: el diseño, el modelado matemático, trabajo de campo, análisis de muestras, métodos de optimización e interpretación de resultados. Esta investigación se enfocó al trabajo de campo y análisis de muestras, por lo que las conclusiones y recomendaciones que aquí se presentan, son de manera general de las pruebas de pozo a pozo de trazadores y de forma específica, respecto a los aspectos prácticos de las propias pruebas de trazadores.

La aplicación de pruebas de trazadores radioactivos no sólo se centra en el área de yacimientos, también se emplea en otras áreas como son la perforación y terminación de pozos, estimulación y fracturamiento de pozos, análisis de tuberías, en instalaciones superficiales de producción, etc.

Las pruebas de trazadores radioactivos son aplicables para yacimientos homogéneos y para fracturados. De dichas pruebas obtenemos datos del yacimiento como son direcciones preferenciales de flujo, velocidades del fluido a través del medio poroso, conectividad entre pozos y tiempos de irrupción.

La técnica de radiotrazado deberá utilizarse de forma conjunta con estudios de geología, registros geofísicos, sísmica, pruebas de presión, para presentar una imagen única del yacimiento. Además proporciona información valiosa que permite tener en cuenta diferentes estudios sobre la caracterización de yacimientos y que son punto de decisión para proyectos de recuperación secundaria y/o mejorada.

El desarrollo actual de las pruebas de trazadores, se encuentra en etapa de maduración y consolidación como herramienta de caracterización de yacimientos. El Instituto Mexicano del Petróleo a través del Departamento de Tecnología Nuclear, en la Ciudad de Villahermosa, Tabasco y del Programa de Investigación de Yacimientos Naturalmente Fracturados, en la Ciudad de México, realizan estudios para mejorar las técnicas de diseño, aplicación e interpretación de las pruebas de trazadores radioactivos.

Una de las ventajas inmediatas de la aplicación de la técnica de radiotrazado es que los resultados preliminares de la prueba se pueden observar desde los primeros días de la inyección del trazador al yacimiento. En el momento de tener detección de radioactividad en cualquiera de las muestras de cualquiera de los pozos, podemos deducir de manera inicial el comportamiento del fluido a través del medio poroso.

El presente trabajo de tesis se recomienda como apoyo a los alumnos de la carrera de ingeniería petrolera para dar a conocer el uso de los trazadores radioactivos, como herramienta adicional para la caracterización de yacimientos, así como, para el uso en otras áreas de la ingeniería petrolera. Es importante conocer esta técnica para contribuir a la actualización de los estudiantes de ingeniería petrolera.

La información proveniente del muestreo es esencial para describir el comportamiento del flujo del trazador en el medio poroso, por lo que se recomienda diseñar adecuadamente las pruebas de trazadores radioactivos de tal forma, que el programa de muestreo garantice en lo posible, obtener tiempos de irrupción confiables, así como un número suficiente de puntos en las curvas de respuesta del trazador.

El costo de la toma de muestras se incrementa debido a que el personal de PEMEX no está facultado para desempeñar este trabajo por lo que el personal del Laboratorio de Tecnología Nuclear, con sede en Villahermosa, requiere trasladarse al Campo en cuestión especialmente para la toma de muestras, por lo que sería conveniente que el personal de PEMEX interesado en este trabajo, obtuviera licencias de manejo de material radioactivo.

En cuanto al trabajo de laboratorio, se puede decir que son muy importantes tanto el factor humano, como el equipo empleado en la medición. El laboratorio del IMP cuenta con personal profesional altamente capacitado para desempeñar su trabajo, así como con el equipo necesario para realizar la inyección, muestreo y análisis radioquímico de muestras en fase agua.

Una vez que se obtienen los resultados del análisis radioquímico, es necesario presentarlos de forma que sean útiles para su interpretación, es decir, que a partir del trabajo de laboratorio, iniciará la etapa de análisis e interpretación de resultados de la prueba de trazadores radioactivos.

Para trabajar con material radioactivo, es necesario obtener licencias, para lo que se requiere tomar cursos de capacitación en seguridad radiológica y estar al tanto de la normatividad de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). Es conveniente mencionar, que para llevar a cabo pruebas de trazadores radioactivos, se requiere de personal con licencia emitida por la comisión antes mencionada. En México, dentro del área de ingeniería petrolera, sólo personal del IMP cumple con los requisitos para el manejo de sustancias radioactivas, y por esto, tienen un valor agregado por contar con dichas licencias y estar expuestos a emisiones de radiaciones como parte de su trabajo.

GLOSARIO

Actividad.- El número de transiciones nucleares espontáneas que ocurren por unidad de tiempo en una cantidad dada de material radiactivo.

Formalmente la actividad, A , de una cantidad dada de material radiactivo, es el cociente de dN entre dt , siendo dN el número de transiciones nucleares espontáneas que ocurren en un intervalo dt .

Actividad Mínima Detectable (AMD).-Es la actividad que registra el contador de centelleo líquido en el análisis de las muestras para el conteo. Puede establecerse por el número de horas que uno decida; siempre dará el mismo número de cuentas pero entre más tiempo se "cuente", se tendrá una mejor definición del espectro.

Actividad Mínima Inyectable (AMI).- Es la cantidad de actividad mínima inyectable del trazador necesario, el cuál se diseña para marcar la cantidad de agua producida (Qwp). Ésta, es necesaria para obtener los curies de trazador de acuerdo a las distancias y propiedades del yacimiento y depende de los parámetros como el tiempo del fluido (T_f) y de la Actividad Mínima Detectable (AMD) del analizador de centelleo líquido.

Actividad Mínima Inyectable con margen de seguridad (AMIs).- Equivale a considerar 3 veces la AMI, esto se hace tomando en cuenta el decaimiento del isótopo, las condiciones y características del yacimiento con base a los tiempos de irrupción esperados, por ejemplo si el tiempo de irrupción es de 135 días, entonces el T_f es = 406.35. O sea que se le da un margen 3 veces más para asegurarnos que el trazador se va a poder detectar.

Actividad Mínima Inyectable corregida por decaimiento (AMisc).- Es la AMisc corregida por decaimiento para la irrupción, la cual considera el tiempo del fluido Tf en la duración del estudio, la vida media del trazador (5 años aproximadamente de vida útil en el yacimiento); esto nos lleva a determinar la cantidad real a inyectar en el pozo.

Almacén temporal.- La instalación radiactiva autorizada por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias para almacenar por tiempo limitado y que será necesariamente determinado en forma expresa en la autorización correspondiente.

Atenuación.- Es el proceso por el cual la intensidad de la radiación se reduce cuando pasa a través de un material. Es la combinación de los procesos de absorción y dispersión que llevan a la disminución de la densidad de flujo del haz cuando pasa por algún material.

Átomo.- es la partícula más pequeña de un elemento que es capaz de participar en una reacción química.

Bequerel (Bq).- Unidad del SI que se usa para medir la actividad de núclidos radiactivos. La actividad en bequerel de una muestra en un momento dado es el promedio de las desintegraciones por segundo de sus átomos en ese momento.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} = 2.7027 \times 10^{-11} \text{ Ci.}$$

Brensstrahlung.- Radiación electromagnética emitida (como fotones) cuando una partícula cargada de alta velocidad (usualmente un electrón) pierde energía cuando es acelerada o cambia de dirección por el campo eléctrico que rodea al núcleo atómico, por su carga positiva. Los rayos X producidos por un equipo normal de rayos X son bremsstrahlung. En alemán este término significa "radiación de rompimiento".

Concentración Derivada en Aire (CDA).- Es el límite derivado que designa la concentración en aire, para un radionúclido determinado, que ha de ser respirado por un trabajador a un ritmo de respiración de $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ se alcanzaría el límite anual de incorporación (LAI) durante un año laboral de 2000 horas.

Constante de Decaimiento (λ).- Es la fracción del número de átomos de un radionúclido que decae por unidad de tiempo. Su símbolo es λ . Es importante señalar dos hechos propios de la radiación: la constante de decaimiento es propia de cada isótopo inestable y no la altera ninguno de los factores físicos o químicos conocidos actualmente.

Contador Geiger .- Es un instrumento para detectar y medir la radiación. Consiste de un tubo (Geiger-Müller) lleno de gas que contiene dos electrodos, entre los que existe un voltaje donde no fluye una corriente eléctrica. Cuando pasa una radiación ionizante por el tubo e ioniza el gas, se genera un pulso intenso de corriente, de pequeña duración, equivalente al total de iones negativos y positivos generados.

Contaminación Radiactiva.- Es el depósito de material radiactivo en cualquier lugar que pueda dañar personas, echar a perder un experimento, o hacer inadecuados o inseguros para algún propósito productos o equipos. Es la presencia no requerida de material radiactivo. Muchas veces referido como contaminación.

Coulomb (C).- Esta unidad se deriva de las unidades básicas del SI y se define como un ampere por segundo.

Curie (Ci).- Es la unidad empleada anteriormente al SI que se usaba para medir la actividad de material radiactivo en el que se transforman 3.700×10^{10} átomos por segundo.

$$1 \text{ Ci} = 3.700 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Decaimiento Radiactivo.- Es el nombre que se empleaba anteriormente para describir la transformación del núcleo, de un átomo inestable, ocasionada por la emisión espontánea de partículas y/o fotones.

Desechos Radiactivos.- Cualquier material que contenga o esté contaminado con radionúclidos cuyas concentraciones o niveles de radiactividad sean mayores a los señalados por la CNSNS, en la norma técnica correspondiente, y para el cual no se prevé uso alguno. Se le clasifica en desechos radiactivos a nivel bajo (menor a 1 Ci por 3 litros), intermedio (entre 1 Ci a 100 Ci por 3 litros) o alto (mayor 100 Ci por 3 litros).

Dispersión.- El cambio de dirección de una partícula subatómica o un fotón como resultado de una colisión o interacción.

Dosis.- Es la forma general para denotar la cantidad absorbida de radiación o energía. Para propósitos especiales debe ser calificada adecuadamente (dosis absorbida, dosis acumulativa). Si no está calificada, generalmente se refiere a dosis absorbida.

Dosis Absorbida.- la energía depositada por la radiación ionizante en la materia. Técnicamente, la dosis absorbida, D , se define como el cociente entre dE entre dm , donde dE es la energía promedio depositada por la radiación ionizante en una masa dm . La unidad es el Gray (Gy) equivalente a 1 joule kg^{-1} (anteriormente se usaba el rad, $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg g}^{-1}$).

Dosis Acumulada.- Es la dosis total resultante por la repetición de exposiciones a la radiación ionizante.

Dosis Inicial o de Umbral.- El valor de la dosis por debajo del cual se considera que un efecto determinista (no estocástico) no se manifestará.

Equivalente en dosis.-Con fines de protección radiológica se ha encontrado conveniente introducir una magnitud física que correlaciona la dosis absorbida con los efectos deletéreos más importantes de la exposición a la radiación, en particular en efectos estocásticos tardíos. El equivalente en dosis es la cantidad que resulta de la ecuación:

$$H = D \times Q \times N$$

Donde D es la dosis absorbida en Gy, Q es el factor de calidad y N es el producto de otros factores modificantes, que por ahora se considera igual a la unidad. El nombre especial en el SI para la unidad de equivalente en dosis es el Sievert (Sv) (cuando la dosis se da en rad el equivalente de dosis queda en rem).

Equivalente de dosis efectiva (H_E).- Se emplea para evaluar el posible daño de la salud debido a la radiación total del cuerpo, se representa como:

$$H_E = \sum_T W_T \times H_T$$

Donde H_T es el equivalente de dosis para el tejido T y W_T es el factor de ponderación para ese tejido.

Electrón-Volt (eV).- Es la unidad de energía equivalente a la energía que obtiene un electrón al pasar a través de un diferencial de potencial de un volt.

$$1 \text{ eV} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ J} = 1.6022 \times 10^{-12} \text{ erg}$$

$$1 \text{ g} = 5.60999 \times 10^{26} \text{ MeV}$$

$$1 \text{ u} = 931.162 \text{ MeV}$$

Estatcoulomb (esu).- (Unidad electrostática de carga). Es aquella cantidad de carga eléctrica que, cuando se coloca en el vacío a una distancia de un centímetro de una carga igual y del mismo signo, se repelerán con una fuerza de una DINA (abreviada: esu).

$$1 \text{ C} = 3.335640 \times 10^{-10} \text{ esu}$$

Exposición.- Es el cociente de dQ entre dm ; donde dQ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo, producidos en aire cuando todos los electrones, positivos y negativos, liberados por fotones en una masa de aire dm son frenados completamente.

Factor de Calidad (Q).- Es el factor de transferencia de energía lineal por el cual se multiplica la dosis absorbida a fin de obtener, (para fines de protección radiológica), una cantidad que exprese la efectividad de la dosis absorbida, en una escala común, para todos los tipos de radiación ionizante.

Fotomultiplicador.- Es un transductor electrónico que permite convertir una señal luminosa en voltaje eléctrico. Es un dispositivo en el cual los electrones, emitidos originalmente de un fotocátodo, inician una cascada de electrones por emisión secundaria en un multiplicador de electrones.

Gray (Gy).- Unidad del SI de dosis absorbida de energía por unidad de masa, que resulta por el paso de radiación ionizante a través de un material. Un Gray es la dosis absorbida correspondiente a la energía de un joule por kilogramo de masa.

$$1 Gy = 1 J/Kg$$

Ionización.- Es el proceso por el cual el átomo o molécula pierde su neutralidad eléctrica adquiriendo una carga positiva o negativa. En el caso de la ionización por pérdida de un electrón, de los átomos y moléculas del aire, se requiere una energía promedio de 34 eV, para producir un par de iones.

Límite Anual de Incorporación.- Es el límite secundario para la irradiación ocupacional interna y es el valor menor de la incorporación de un radionúclido determinado en un año, que se traduciría en un equivalente de dosis efectivo comprometido de 50 mSv (5 rem) o bien, en un equivalente de dosis comprometido en el cristalino de 150 mSv (15 rem), o en un equivalente de dosis comprometido en cualquier otro órgano o tejido de 500 mSv (50 rem).

Isótopos.- Son átomos, que en su núcleo , tienen el mismo número de protones, por ende el mismo número atómico, pero distinto número de neutrones y por lo tanto diferente número de masa. Sin embargo, existen propiedades químicas idénticas entre isótopos de un mismo elemento. Este término no debe emplearse como sinónimo de núclido.

Límites para Personal Ocupacionalmente Expuesto. El límite equivalente de dosis efectivo anual para el personal ocupacionalmente expuesto es de 50 *mSv* (5 rem), para los efectos estocásticos. Para los efectos no estocásticos el límite anual equivalente de dosis es de 500 *mSv* (50 rem), para los distintos órganos y tejidos, excepto para el cristalino, para el cual es de 150 *mSv* (15 rem).

Límites para Público.- El límite equivalente de dosis efectivo anual para individuos del público es de 5 *mSv* (0.5 rem), para los efectos estocásticos. Para efectos no estocásticos el límite equivalente en dosis anual es de 50 *mSv* (5 rem). Cuando los individuos del público pueden estar expuestos por periodos prolongados (muchos años) el valor medio anual del equivalente de dosis efectivo se procurará que sea de 1 *mSv* (0.1 rem).

Manual de Seguridad Radiológica.- Documento cuyo objetivo es el que todas las acciones que involucren fuentes de radiación, se ejecuten bajo normas y procedimientos de protección radiológica, adecuados para reducir las exposiciones ocupacionales y del público a valores tan bajos como razonablemente pueda lograrse.

Partícula Alfa (α).- Es la partícula cargada emitida por algunos materiales radiactivos. Compuesta por dos protones y dos neutrones unidos entre sí, que es idéntica al núcleo del átomo de helio. Es la menos penetrante de los tres tipos comunes de radiación (alfa, beta, gamma) emitida por material radiactivo, que es totalmente detenida por el grosor de una hoja de papel. No es dañina a las plantas, animales o al hombre a menos que la sustancia emisora esté dentro del organismo.

$$\text{Masa en reposo: } m = 6.64226 \times 10^{-27} \text{ Kg} = 4 \text{ u} = 3725.9 \text{ MeV}$$

$$\text{Carga } e = 3.2 \times 10^{-16} \text{ C}$$

Partícula Beta (β).- Es la partícula con carga eléctrica, negativa o positiva, emitida por el núcleo de un átomo, con masa y carga iguales en magnitud a las del electrón.

$$\text{Masa en reposo: } m = 9.1093897 (54) \times 10^{-31} \text{ Kg} = 5.4858 \times 10^{-4} \text{ u} = 0.51098 \text{ MeV}$$

$$\text{Carga } \beta_{-}^{+} = \pm 1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ C}$$

Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE).- Aquel que en ejercicio y motivo de su ocupación está expuesto a radiación ionizante o a la incorporación de material radiactivo. Quedan excluidos los trabajadores que ocasionalmente en el curso de su trabajo puedan estar expuestos a este tipo de radiación, siempre que el equivalente de dosis efectivo anual que reciban no exceda el límite establecido para el público.

rad.- Es la unidad de dosis absorbida que se usó antes del SI para medir la dosis absorbida de radiación de 100 ergs por gramo de materia.

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 1 \times 10^{-2} \text{ J/Kg} = 1 \times 10^{-2} \text{ Gy}$$

Radiación.- La emisión y propagación de energía a través del espacio o a través de un medio material en la forma de ondas; por ejemplo, la emisión y propagación de ondas electromagnéticas, o de ondas elásticas o de sonido. Por extensión, se aplica a la emisión corpuscular, tal como la radiación Alfa y Beta, mezcla de rayos o de tipo desconocido, como la radiación cósmica.

Radiación Ionizante.- Radiaciones de naturaleza electromagnética (fotones de rayos X o de rayos Gamma) o de naturaleza corpuscular que pueden producir ionización al atravesar la materia.

Radiactividad o Material Radiactivo.- Es la propiedad de ciertos núclidos de emitir espontáneamente partículas o radiación gamma o de emitir radiación X después de una captura de un electrón orbital o en el proceso de fisión espontánea.

Radiación Natural.- Es la propiedad de irradiar exhibida por más de 50 radionúclidos encontrados en la naturaleza.

Radiactividad Artificial.- Es la radiactividad producida por el hombre al bombardear a la materia con partículas o radiación electromagnética, a diferencia de la radiactividad natural.

Radiactividad Inducida.- Es la radiactividad producida en sustancias después de bombardearla con neutrones u otras partículas. La actividad resultante es la radiactividad natural si se forma por reacciones nucleares que ocurren en la naturaleza, y radiactividad artificial si las reacciones son causadas por el hombre.

Rapidez de dosis absorbida.- Es el cociente de dD entre dt ; donde dD es el cambio de la dosis absorbida en el intervalo de tiempo dt .

Rapidez de Equivalente en dosis.- Es el cociente de dH entre dt ; donde dH es el cambio del equivalente de dosis en el tiempo dt .

Rapidez de Exposición.- Es el cociente de dx entre dt ; donde dx es el cambio de exposición en el intervalo de tiempo dt .

Rayos Alfa.- Es una corriente de partículas alfa. Librementemente, es un sinónimo de partícula Alfa.

Rayos Beta.- Es una corriente de partículas beta. Librementemente, es un sinónimo de partícula Beta.

Rayos Delta.- se denomina a cualquier partícula ionizante secundaria emitida por el retroceso cuando una partícula ionizante primaria pasa por la materia.

Rayos Gamma (γ).- Es la radiación electromagnética de longitud de onda corta de origen nuclear (con energía mayor a 0.01 MeV) emitidos por el núcleo. La radiación Gamma frecuentemente acompaña la emisión de emisiones Alfa o Beta y siempre acompaña al proceso de fisión. Los rayos Gamma son muy penetrantes y la mejor forma de detenerlos es con materiales de alta densidad, tales como el plomo y el uranio no activo (que tenga menos del 0.7% de U-235). Los rayos Gamma son esencialmente similares a los rayos X (usualmente más energéticos) y de origen nuclear.

rem.- Fue la unidad para medir el equivalente de dosis antes del SI. El equivalente de dosis en rems es igual a la dosis absorbida en rad multiplicada por el factor de calidad (Q), y el producto de otros factores modificantes que por ahora se consideran igual a la unidad.

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times Q$$

Roentgen (r).- Cantidad de exposición a la radiación X o Gamma, necesaria para que la emisión corpuscular asociada pueda producir una carga de una unidad electrostática, en iones de uno y otro signo por 0.001293 g de aire (2.58×10^{-4} C/Kg). Fue la unidad previa al SI para medir la dosis de exposición de los rayos X o Gamma.

$$1 \text{ r} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg} = 1 \text{ esu/cm}^3 \text{ de aire a condiciones estándar}$$

$$1 \text{ C/Kg} = 3876 \text{ r}$$

SI.- Sistema Internacional de Unidades adoptado por todos los países donde se definen las unidades de medición que se usan con fines científicos y comerciales. Este sistema de unidades es coherente y racional.

Sievert (Sv).- El Sievert es la unidad correspondiente al equivalente de dosis de radiación (H) que se usa para propósitos de seguridad radiológica, en el Sistema Internacional de Unidades. El equivalente en dosis, expresada en Siervets, es el producto de la dosis absorbida en Grays (D) por el Factor de Calidad (Q) y por el producto de otros factores modificantes (N), que por el momento se considera igual a la unidad.

Unidad de Masa Atómica (u).- Esta unidad es la masa atómica de un átomo neutro de carbono-12 dividida entre 12, que equivale a $1.6605655 \times 10^{-24}$ g.

Unidad de Exposición (C/Kg).- Es la cantidad de radiación X o g que produce, en un kilogramo de aire seco a condiciones estandar (0° C y 760 mmHg), una cantidad de iones cuya carga total es un coulomb de cada signo.

$$1 \text{ C/Kg} = 34 \text{ Gy}$$

$$1 \text{ C/Kg} = 3876 \text{ r}$$

Vida Media Fisica.- Es el tiempo requerido para que un radionúclido pierda el 50% de su propia actividad, mediante decaimiento radiactivo. Cada radionúclido tiene una vida media física propia.

Vida Promedio.- Es el promedio de tiempo de vida para un sistema atómico o nuclear en un estado especificado. Para un sistema que decae exponencialmente, es el tiempo promedio para que un número de átomos o núcleos es un estado especificado se decremente por un factor de $e^{2.718}$.

Nomenclatura

- A.- Número másico.
- A.- Actividad al tiempo t, Ci, Bq, etc.
- X.- Cualquier elemento químico
- Z.- Número atómico
- N.- Número inicial de átomos radiactivos presentes.
- N_0 .- Número de átomos al paso de cierto tiempo.
- dN.- Diferencial de número de átomos
- dt.- Diferencial de tiempo.
- t.- Tiempo, días, horas, minutos, segundos
- α .- Designación de emisión de partículas Alfa.
- β .- Designación de emisión de partículas Beta.
- γ .- Designación de emisión de partículas Gamma.
- λ .- Actividad específica. Constante de decaimiento, t^{-1} , seg^{-1} , min^{-1} , etc.

Bibliografía

- 1.- BERNARD, ZEMEL, 1995, "Tracers in the Oil Field". ELSEVIER SCIENCE.
- 2.- BRIGHAM, W.E, 1974, "Mixing Equations in Short Laboratory Cares", Transactions, Vol. 257, 91
- 3.- CARVAJAL, ANDRÉS y MORALES, NORMA, 1994, "Uso de trazadores radioactivos en la caracterización de yacimientos petroleros", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería. UNAM.
- 4.- CHOPPIN, GREGORY R y JAFFE, BERNARD, 1977, Decimoquinta edición "Química", Publicaciones Cultural.
- 5.- CORTES, MARÍA EUGENIA y RAMÍREZ, PABLO, 1992, "Manual de Seguridad Radiológica". Instituto Mexicano del Petróleo, Subdirección general de investigación aplicada.
- 6.- Diario Oficial de la Federación
Emisión del día martes 22 de noviembre de 1988.
- 7.- G.J. LICHTENBERG, ORXY ENERGY CO.
"Field Applications of Interwell Tracers for Reservoir Characterization of Enhanced Oil Recovery Pilot Areas", Society of Petroleum Engineers, SPE 21652 Oklahoma City, 1991.
- 8.- HILDEGARDE L.A.SACARELLO, 1982, "Handbook of hazardous materials. (Regulation, handling, monitoring and safety)", Ed. Lewis.
- 9.- HORNE, R.N. 1982, "Geothermal Reinjection Experiences in Japan", JPT, (pags 495-503).
- 10- JENSEN, C.L, 1983, "Matrix Difussion and its Effects on the Modeling of Tracer Returns from Fractured Geothermal Reservoir at Wairakei, New Zeland", SGP-TR-71 Stanford, California.
- 11.- J.L. TAYLOR y T.R. BRANDY, 1989, "Tracer Technology Finds Expanding Applications". Petroleum Engineer International.
- 12.- K.GARDER, T. y BJORNSTAD, I. HUNDERE. "The Usefulness of Multitracer Test in Petroleum Reservoir Studies", Institutt for Energiteknikk, Norway.

- 13.- M.A. VIELLA y L.B. ZERPA, 1999, "Water and Gas Tracers at El Furrial field". Society of Petroleum Engineers, SPE 53737, Caracas, Venezuela.
- 14.- NÁJERA, JESÚS. 1969, "Aplicación del tritio como trazador en lo campos petroleros de recuperación secundaria por inyección de agua". IMP.
- 15.- NÁJERA, JESÚS. 1968, "Aplicaciones de la radiactividad en la industria petrolera". IMP.
- 16.- O.R.WAGNER y L.E. BAKER y GORDON R. SCOTT, 1974, "The Design and Implementation of Multiple Tracer Program for Multifluid, Multiwell Injection Projects". Amoco Co., Amoco Canada. Society of Petroleum Engineers SPE 5125 Dallas, Texas.
- 17.- RAMIREZ , JETZABETH, 1988, "Modelo para predecir el flujo de trazadores en yacimientos geotérmicos naturalmente fracturados". Tesis para Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 18.- SOLARES, JAVIER, 2001, "Metodología empleada en la interpretación de pruebas de trazadores". Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 19.-STEPHEN CHEUNG y AIMEE EDWARDS. 1999, "A Novell to Interwell Tracer Design and Field Case History." Society of Petroleum Engineers, SPE 56610, Houston, Texas.

PÁGINAS DE INTERNET CONSULTADAS:

<http://www.cchen.cl> (Página de Internet de la comisión chilena de energía nuclear).

<http://www.umce.cl/uvirtual/enuclear/recursos/Nuclear/VC3/Trazadores.html>

(Página de la comisión chilena de energía nuclear)

Apéndice A

Normatividad y Seguridad en el manejo de material radioactivo

Debido a que la seguridad y normatividad para el uso, manejo, transporte y posesión de sustancias radiactivas es de vital importancia, en este capítulo se presentan los aspectos principales y la manera en que están relacionados con el uso de material radioactivo que se emplean en la industria petrolera y en específico, con los materiales destinados para las pruebas de trazadores radioactivos.

El apéndice se divide en dos grandes secciones, la primera es referente a la normatividad y la legislación en materia nuclear, se mencionan los principales aspectos que deben considerarse para todo lo referente a los materiales radioactivos en nuestro país. Se mencionan los organismos que regulan todo lo relacionado a la materia de normatividad y a la seguridad en México, en especial a la Secretaría de Energía y a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) quienes son los encargados de atender lo referente al tema.

La segunda sección toca puntos importantes referentes a la seguridad radiológica, se citan aspectos prácticos e importantes con respecto a la seguridad tanto de la adquisición, manejo, almacenamiento, transporte y uso de material radioactivo. Se comentan los principales problemas a los que están expuestos los trabajadores que operan con estas sustancias y algunos puntos importantes para conservar la seguridad y evitar la exposición dañina de los seres vivos.

Se mencionan aspectos importantes como la adquisición de licencias tanto para la compra como para el manejo de material radioactivo, así como para la venta del mismo. Se describen a grandes rasgos los requerimientos para adquirir o vender o manejar el material radioactivo, se hablará de los peligros a los que están expuestas tanto las personas que laboran con material radioactivo, así como el impacto al medio ambiente por la emisión de radioactividad, los límites permisibles, las dosis adquiridas y de otros conceptos relacionados al tema, que sin duda es importante conocer para evitar accidentes y repercusiones graves.

Se hace referencia a manuales de seguridad radiológica y a la normatividad que regula el uso, manejo, transporte y posesión de material radioactivo en México, es decir, a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación que es el documento final y oficial para este tema de la legislación en materia radiactiva.

A.1 Organismos Responsables.

A.1.1 Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.

En México el organismo principal encargado de la regulación en materia nuclear es la Secretaría de Energía, que a su vez, tiene un organismo directo que se encarga de todo lo relacionado al manejo de material radioactivo que es la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).

La Secretaría de Energía, entidad dependiente del Poder Ejecutivo Federal, tiene como encargo el despacho de los asuntos inherentes a la conducción de la política energética nacional, con facultades para ejercer los derechos de la nación en materia de hidrocarburos; así como el aprovechamiento de los bienes y recursos naturales que se requieran para la conducción de la generación, transformación, distribución y abastecimiento de la energía eléctrica, que tenga por objeto la prestación del servicio público.

A.1.2 Objetivo de la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.

Conducir la política energética del país y ejercer los derechos de la Nación en materia de recursos energéticos, para garantizar el suministro adecuado de hidrocarburos y electricidad como servicio público, para lo cual promoverá la participación de los particulares en la generación de electricidad y distribución de gas natural y L.P.; regular y expedir normas oficiales mexicanas en materia energética, así como coordinar las actividades de las entidades paraestatales del sector.

A.1.3 Objetivo de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS)

Asegurar que las actividades en donde se involucren materiales nucleares, radioactivos y fuentes de radiación ionizante se lleven al cabo con la máxima seguridad, considerando los desarrollos tecnológicos actuales.

A.1.4 Atribuciones y responsabilidades.

De acuerdo a lo establecido en la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, específicamente en el Artículo 50, las principales atribuciones de la CNSNS son establecer y vigilar la aplicación de normas y reglamentos de seguridad nuclear, radiológica, física y las salvaguardias, para el funcionamiento de instalaciones nucleares y radiactivas, así como el uso, manejo, transporte y posesión del material nuclear y radioactivo, se lleven a cabo con la máxima seguridad de los usuarios directos y del público en general.

En virtud de tales atribuciones, la CNSNS realiza diversas actividades, entre las que se incluyen:

- Elaboración de Normas y Reglamentos.
- Licenciamiento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas.
- Evaluación de Programas de Garantía de Calidad y de Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental.
- Realización de auditorías, supervisiones, visitas técnicas, inspecciones y verificaciones a instalaciones nucleares y radiactivas.
- Realización de inspecciones y auditorías relativas a seguridad física y salvaguardias.
- Evaluación y Licenciamiento de operadores de instalaciones nucleares.
- Expedición de licencias y permisos para la importación, uso, transporte y almacenamiento de materiales radioactivos.
- Evaluación y licenciamiento de depósitos definitivos para desechos radioactivos.
- Participación en convenios de asistencia técnica y cooperación internacional.
- Ejecución de proyectos de investigación y desarrollo de manera independiente o por asociación con otros organismos reguladores o centros de investigación.

A continuación se citarán algunos artículos que se tienen en la legislación publicada en el diario oficial de la federación del día Lunes 4 de Febrero de 1985. Como se entenderá no es práctico ni es el objetivo del presente trabajo mencionar todos y cada uno de los artículos referentes a material radioactivo, así que se seleccionarán los más importantes.

A.2 Ley Reglamentaria del artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear

Capítulo I. Disposiciones generales

Artículo 1°.- La presente Ley es reglamentaria del artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear y regula la exploración, la explotación y el beneficio de minerales radioactivos, así como también el aprovechamiento de los combustibles nucleares, los usos de la energía nuclear, la investigación de la ciencia y las técnicas nucleares, la industria nuclear y todo lo relacionado con la misma.

El Gobierno Federal es quien se encarga de lo referente a material radioactivo y emite el siguiente artículo a este respecto.

Capítulo II. La Exploración, Explotación y Beneficio de Minerales Radioactivos.

Artículo 5°.- los minerales radioactivos, en los términos del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, son propiedad de la Nación; y su exploración, explotación y beneficio no podrá ser materia de concesión o contrato. Para la exploración, explotación y beneficio de los materiales radioactivos definidos en la fracción IX del artículo 3° de esta Ley, la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, otorgará las asignaciones correspondientes a los órganos públicos previstos en los artículos 9° y 10° de la presente Ley. Estas asignaciones incluirán también los minerales no radioactivos asociados.

La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, tiene a su vez a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias para estar a cargo a lo referente a material radioactivo; en el diario oficial de la federación se encuentra un artículo referente a esto.

Aquí se mencionan algunas de las funciones que tiene la Comisión. Son las más representativas y apegadas al tema de nuestro trabajo.

Capítulo VI. La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias

Artículo 50º.- La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias es un órgano desconcentrado dependiente de la Secretaría de Energía e Industria Paraestatal, con las siguientes atribuciones:

- *Vigilar la aplicación de las normas de seguridad nuclear radiológica, física y las salvaguardias para que el funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas se lleven a cabo con la máxima seguridad para los habitantes del país.*
- *Vigilar que en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos se cumpla con las disposiciones legales y los tratados internacionales de los que México sea signatario, en materia de seguridad nuclear radiológica, física y de salvaguardias.*
- *Emitir opinión, previamente a la autorización que otorgue el Secretario de Energía, Minas e Industria Paraestatal, sobre emplazamiento, diseño, construcción, operación, modificación, cese de operaciones, cierre definitivo y desmantelamiento de instalaciones nucleares.*
- *Expedir, revalidar, reponer, modificar y revocar, los permisos y licencias radiactivas de acuerdo a las disposiciones legales, así como recoger y retirar en su caso los utensilios y, en general, cualquier bien inmueble contaminado, en dichas instalaciones.*
- *Emitir opinión previa a la autorización de importaciones y exportaciones de materiales radioactivos y equipos que los contengan, así como de materiales y combustibles nucleares, para los efectos de seguridad, registro y control.*

- *Establecer los requisitos que deberán satisfacer los programas de capacitación técnica sobre aspectos relacionados con la seguridad nuclear, radiológica y física y de salvaguardias.*
- *Ordenar y practicar auditorías, inspecciones, verificaciones y reconocimientos para comprobar el cumplimiento y observancia de las disposiciones legales en materia de seguridad nuclear, radiológica, física y de salvaguardias; así como imponer las medidas de apremio y las sanciones administrativas que procedan de acuerdo a las disposiciones de esta Ley y sus reglamentos.*

Estas son algunas de las actividades que desempeña la CNSNS y éstas actividades están publicadas en el Diario Oficial de la Federación. Como se ve la seguridad en materia nuclear es de gran importancia y según lo leído no es tan fácil el estar dentro de este medio donde las disposiciones para cualquier actividad referente a los materiales radioactivos y es precisamente debido a los requisitos que emite la CNSNS.

A.2.1 Trámites y servicios al público

La CNSNS tiene un índice muy variado para trámites que el público en general quiera realizar, algunos de los trámites y servicios al público son los siguientes:

- *Atención de accidentes radiológicos durante el uso y transporte de material radioactivo.*
- *Autorización de adquisición y transferencia de material radioactivo.*
- *Autorización de almacenamiento temporal de material radioactivo.*
- *Autorización de importación de fuentes de radiación ionizante.*
- *Autorización de transporte de material radioactivo.*
- *Autorización para instalar y dar servicio a fuentes de radiación ionizante y equipos que las contengan.*

- *Autorización para valorar las pruebas de fuga de fuentes selladas de material radioactivo.*
- *Autorización para dar servicios de calibración a equipos de detectores de radiación ionizante.*
- *Autorización para la exportación de fuentes de radiación ionizante.*
- *Licencia de modificación de una instalación radiactiva.*
- *Licencia para la operación de una instalación radiactiva.*
- *Licencias de operación de una instalación radiactiva para estudios geofísicos de pozos en unidades móviles.*
- *Licencia de operación de una instalación radiactiva para investigación.*
- *Licencia de operación de una instalación radiactiva para medidores de nivel, de espesor o de densidad en instalación fija.*
- *Renovación de autorización, permisos y licencias.*

En las Figuras, A.1 y A.2 se muestran las formas que emite la CNSNS para diferentes tramites que se necesiten hacer así como los requisitos para que se puedan otorgar permisos y/o licencias de manejo de material radioactivo.

Como se ha visto en el desarrollo de este apéndice, las licencias y permisos se deben de tramitar con base a lo reglamentado y con todos los dispositivos de seguridad para su uso correcto. Los formatos para expedición de licencias y permisos contienen diferentes requisitos dependiendo de la función que se desee desempeñar, es decir que si se es el vendedor, es un tipo de licencia, si se es comprador es otro tipo, si se maneja debemos de cumplir ciertos requisitos y así para toda las modalidades de manejo de material radioactivo.



**MANUAL DE TRAMITES
Y
SERVICIOS AL PUBLICO**

PROGRAMA GENERAL DE SIMPLIFICACION DE LA ADMINISTRACION PUBLICA FEDERAL		
VIGENCIA	HOLLA	
MES	AÑO	NÚM. DE
10	1991	21

NOMBRE DEL TRAMITE O SERVICIO		TEMPO DE RESPUESTA
AUTORIZACION DE ALMACENAMIENTO TEMPORAL DE MATERIAL RADIOACTIVO.		25 días hábiles.
USUARIOS	COMPROBANTE A OBTENER	
Permisarios con licencias vigentes de operación y autorizaciones de adquisición y transferencia de material radiactivo, emitidas por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias	Autorización de almacenamiento temporal de material radiactivo	
DESCRIPCION		
Evaluación de las condiciones de seguridad física y radiológica aplicables para el almacenamiento de material radiactivo, riesgos asociados y Plan de Emergencia		
COSTO	AREA DE PAGO	
Gratuito.	No aplicable	
AREA DE INFORMACION		
CENTRAL: Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias Departamento de Evaluación y Licenciamiento		
DIRECCION		
Dr. Barragan No. 774 Piso No. 2, Col. Vertiz Saravate C.P. 03020, Delegación Benito Juárez, México, D.F.		
HORARIO DE ATENCION		TELÉFONOS
9:00 a 12:00 horas y 14:00 a 16:00 horas		562-11-56 y 562-70-21
FUNDAMENTO LEGISLATIVO ADMINISTRATIVO		
Ley Reglamentaria del Artículo 2º Constitucional en Materia Nuclear Reglamento General de Seguridad Radiológica, Artículos 189, 190 y 201		

Fig. A.1 Formato de autorización de almacenamiento temporal de material radioactivo.



**MANUAL DE TRÁMITES
Y
SERVICIOS AL PÚBLICO**

PROGRAMA GENERAL DE SIMPLIFICACIÓN DE LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA FEDERAL			
VICENCIA	HOJA		
MES	AÑO	Nº	DE
10	94	30	120

REQUISITOS

Presentar:

- I) - Solicitud en el formato oficial correspondiente.
- II) - Copia del Acta Constitutiva de la empresa debidamente inscrita en el Registro Público de la Propiedad, en cuyo objeto social debiera estar incluido el almacenamiento de material radioactivo.
- III) - Memoria analítica de la instalación.
- IV) - Planos arquitectónicos de la instalación, en donde se indiquen las áreas adyacentes a la misma y el tipo de uso a que están destinadas tales áreas
- V) - Manual de Seguridad Radiológica
- VI) - Análisis de Riesgos y Plan de Emergencia
- VII) - Propuesta de una persona para Encargado de Seguridad Radiológica.
- VIII) - Propuesta de las personas que podrán fungir como Personal Ocupacionalmente Expuesto.
- IX) - Anexando por escrito la información relativa a:
 1. Actividades máximas de los radioisótopos
 2. Procedimiento y registro de recepción y entrega de los materiales radiactivos.
 3. Características de los equipos detectores de radiación ionizante.

Fig. A.2 Formato de autorización de almacenamiento temporal de material radioactivo.

Acorde a esto se tienen, también, algunas Normas Oficiales Mexicanas en materia de protección radiológica y seguridad Nuclear las cuales dan el rumbo de cómo y bajo que esquemas de seguridad y normatividad se deben realizar las operaciones referentes a sustancias radiactivas.

A.3 Normas Oficiales Mexicanas en materia de Protección Radiológica y Seguridad Nuclear.

La Secretaría de Energía, a través del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Seguridad Nuclear, Subcomités y Grupos de Trabajo, emite las Normas Oficiales Mexicanas en materia de seguridad nuclear, en cumplimiento con la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento.

Las Normas Oficiales Mexicanas publicadas en el Diario Oficial de la Federación a la fecha, se presentan a continuación en la siguiente tabla:

Tabla A.1 Normas Oficiales Mexicanas en materia de Protección Radiológica y Seguridad Nuclear.

Clave	Título de la Norma	Fecha de Publicación en el D. O. F.
NOM-001-NUCL-1994	FACTORES PARA EL CÁLCULO DEL EQUIVALENTE DE DOSIS.	6-feb-96
NOM-002-NUCL-1994	PRUEBAS DE FUGA Y HERMETICIDAD DE FUENTES SELLADAS.	23-feb-96
NOM-003-NUCL-1994	CLASIFICACIÓN DE INSTALACIONES O LABORATORIOS QUE UTILIZAN FUENTES ABIERTAS.	7-feb-96
NOM-004-NUCL-1994	CLASIFICACIÓN DE LOS DESECHOS RADIOACTIVOS.	4-mar-96
NOM-005-NUCL-1994	LIMITES ANUALES DE INCORPORACIÓN (LAI) Y CONCENTRACIONES DERIVADAS EN AIRE (CDA) DE RADIONUCLIDOS PARA EL PERSONAL OCUPACIONALMENTE EXPUESTO.	16-feb-96
NOM-006-NUCL-1994	CRITERIOS PARA LA APLICACIÓN DE LOS LIMITES ANUALES DE INCORPORACIÓN PARA GRUPOS CRÍTICOS DEL PÚBLICO.	20-feb-96
NOM-007-NUCL-1994	REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA QUE DEBEN SER OBSERVADOS EN LOS IMPLANTES PERMANENTES DE MATERIAL RADIOACTIVO CON FINES TERAPEUTICOS A SERES HUMANOS.	3-abr-96
NOM-008-NUCL-1994	LIMITES DE CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL CON MATERIAL RADIOACTIVO.	5-mar-96

Cont. Tabla A.1		
NOM-012-NUCL-1995	REQUERIMIENTOS Y CALIBRACIÓN DE MONITORES DE RADIACIÓN IONIZANTE.	16-jul-97
NOM-013-NUCL-1995	REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA PARA EGRESAR A PACIENTES A QUIENES SE LES HA ADMINISTRADO MATERIAL RADIOACTIVO.	11-ene-99
NOM-018-NUCL-1995	MÉTODOS PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE ACTIVIDAD Y ACTIVIDAD TOTAL EN LOS BULTOS DE DESECHOS RADIOACTIVOS.	12-ago-96
NOM-019-NUCL-1995	REQUERIMIENTOS PARA BULTOS DE DESECHOS RADIOACTIVOS DE NIVEL BAJO PARA SU ALMACENAMIENTO DEFINITIVO CERCA DE LA SUPERFICIE.	14-ago-96
NOM-020-NUCL-1995	REQUERIMIENTOS PARA INSTALACIONES DE INCINERACIÓN DE DESECHOS RADIOACTIVOS.	15-ago-96
NOM-021-NUCL-1996	PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN PARA ESPECÍMENES DE DESECHOS RADIOACTIVOS SOLIDIFICADOS	4-ago-97
NOM-022/1-NUCL-1996	REQUERIMIENTOS PARA UNA INSTALACIÓN PARA EL ALMACENAMIENTO DEFINITIVO DE DESECHOS RADIOACTIVOS DE NIVEL BAJO CERCA DE LA SUPERFICIE. . PARTE 1 SITIO.	5-sep-97
NOM-022/2-NUCL-1996	REQUERIMIENTOS PARA UNA INSTALACIÓN PARA EL ALMACENAMIENTO DEFINITIVO DE DESECHOS RADIOACTIVOS DE NIVEL BAJO CERCA DE LA SUPERFICIE. PARTE 2 DISEÑO.	5-sep-97

Cont. Tabla A.1		
NOM-022/3-NUCL-1996	REQUERIMIENTOS PARA UNA INSTALACION PARA EL ALMACENAMIENTO DEFINITIVO DE DESECHOS RADIOACTIVOS DE NIVEL BAJO CERCA DE LA SUPERFICIE. PARTE 3. OPERACIÓN Y CLAUSURA.	14-ene-99
NOM-024-NUCL-1995	REQUERIMIENTOS Y CALIBRACIÓN DE DOSIMETROS DE LECTURA DIRECTA.	5-ago-97
NOM-025/2-NUCL-1996	REQUISITOS PARA EQUIPO DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL. PARTE 2 OPERACIÓN.	18-ago-97
NOM-026-NUCL-1999	VIGILANCIA MÉDICA DEL PERSONAL OCUPACIONALMENTE EXPUESTO A RADIACIONES IONIZANTES.	5-jul-99
NOM-027-NUCL-1996	ESPECIFICACIONES PARA EL DISEÑO DE INSTALACIONES RADIATIVAS TIPO II CLASES A, B Y C.	23-sep-97
NOM-028-NUCL-1996	MANEJO DE DESECHOS RADIOACTIVOS EN INSTALACIONES RADIATIVAS QUE UTILIZAN FUENTES ABIERTAS.	22-dic-98
NOM-031-NUCL-1999	REQUERIMIENTOS PARA LA CALIFICACION Y ENTRENAMIENTO DEL PERSONAL OCUPACIONALMENTE EXPUESTO A RADIACIONES IONIZANTES.	28-dic-99
NOM-032-NUCL-1997	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA OPERACION DE UNIDADES DE TELETERAPIA QUE UTILIZAN MATERIAL RADIOACTIVO.	30-dic-98
NOM-035-NUCL-1999	LÍMITES PARA CONSIDERAR UN RESIDUO SÓLIDO COMO DESECHO RADIOACTIVO	19-may-00

A.4 Reglamento General de Seguridad Radiológica.

Con respecto a la seguridad en materia nuclear, se tiene el Reglamento General de Seguridad Radiológica. La edición mas reciente fue publicada el día 22 de noviembre de 1988 en el Diario Oficial de la Federación.

El reglamento es un documento muy extenso y como se analizó la parte anterior que se refiere a la normatividad y legislación en materia nuclear, en esta parte del trabajo, mencionaremos los artículos mas importantes así como también algunos conceptos importantes en materia de seguridad radiológica.

El Reglamento General de Seguridad Radiológica toca puntos importantes que deberán ser considerados para cuando se esté en contacto con material radioactivo, en este apéndice se mencionan los puntos más importantes a este respecto, si bien es cierto que no se mencionan todos los puntos por cuestiones de espacio y por que no es el objetivo del presente trabajo, no debe de considerarse falta de importancia para la aplicación de la seguridad en materia nuclear lo que aquí no se mencione.

Titulo Primero. Generalidades. Capitulo Único

Artículo 1°.- Este reglamento rige en todo el territorio nacional y tiene por objeto proveer en la esfera administrativa a la observancia de la Ley reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear en lo relativo a seguridad radiológica.

Artículo 2°.- La Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal queda facultada para expedir por conducto de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, los apéndices, normas técnicas, manuales e instructivos, así como sus actualizaciones, necesarios para desarrollar, hacer explícitas y determinar la forma en que deban cumplirse las disposiciones de este reglamento.

En base a estos dos artículos donde se muestra claramente cómo la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, da la facultad de ver y procurar por medio de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias todo lo relacionado al material radioactivo. A continuación mencionaré algunos puntos que tienen que ser tocados cuando se habla de seguridad radiológica, sus implicaciones y algunas formas de poder prever la contaminación con materiales radioactivos tanto para el ser humano, los animales y plantas así como para el medio ambiente en general.

A.4.1 Seguridad Radiológica.

A.4.2 Objetivos de la protección radiológica.

La finalidad de la Protección Radiológica es resguardar a los individuos, sus descendientes, el medio ambiente y los bienes, de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. En sí, se pueden citar dos objetivos principales:

- Evitar los efectos determinísticos
- Reducir la probabilidad de los efectos estocásticos a un nivel que se considere aceptable.

A.4.3 Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes.

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes se han clasificado en dos categorías:

- Efectos estocásticos
- Efectos determinísticos (no estocásticos)

La emisión de radiaciones ionizantes tienen dos características importantes: que penetran la materia y que depositan energía en ella. La penetración depende del tipo de radiación, de su energía y del material que debe penetrar.

A.4.4 Efectos somáticos.

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes se han clasificado de acuerdo al tipo de células afectadas. Cuando estos efectos se manifiestan en el individuo expuesto a la radiación ionizante, se ha referido como efectos somáticos.

Sí dichos efectos se observan poco tiempo después de la irradiación, se dice que son efectos precoces o a corto plazo; si se presentan después de algunos meses o de varios años se llaman efectos tardíos o a largo plazo. Los efectos somáticos pueden ser estocásticos como la inducción del cáncer, o no estocásticos, por ejemplo, las cataratas.

Asimismo, los efectos biológicos pueden manifestarse en los descendientes de la persona irradiada, por lo que se les llama efectos genéticos o hereditarios. Las alteraciones pueden ir desde un cambio en el color de los ojos hasta síndrome de Down o la muerte del organismo en alguna etapa temprana.

La exposición a una dosis de radiación aguda al cuerpo entero, afecta todos los órganos y sistemas del organismo. Sin embargo, la sensibilidad de los tejidos varía y el patrón de respuesta o síndrome de enfermedad en un individuo sobrepuesto, depende de la magnitud de la dosis.

Ciertos efectos son comunes a todas las categorías de sobreexposición, siendo estos algunos de los más representativos:

- Nausea y Vómito
- Malestar y Fatiga
- Aumento de temperatura
- Cambios sanguíneos
- Dependiendo del tipo de exposición y el tiempo, puede derivar en la muerte

A.4.5 Efectos estocásticos.

Los efectos estocásticos obedecen a una relación dosis-efecto de naturaleza probabilística. Cuando una población grande se expone a las radiaciones, estos efectos aparecen en algunos individuos, y ello aparentemente al azar. De ahí su nombre de "estocásticos".

Entre estos efectos se encuentran, principalmente, la aparición de enfermedades degenerativas y los efectos hereditarios. Los estudios estadísticos muestran que la frecuencia natural de dichas enfermedades varía, a veces considerablemente, con el medio ambiente, los caracteres ligados a la herencia y otros factores.

La magnitud de la dosis recibida no influye en la gravedad del efecto estocástico. Además, no es posible distinguir, para un efecto de este tipo, en el estado actual de los conocimientos, entre un caso debido a las radiaciones y un caso espontáneo. Estos efectos son siempre diferidos, o sea pueden transcurrir varios años o varias decenas de años entre la exposición y la aparición de la lesión.

A.4.6 Efectos determinísticos.

Los efectos determinísticos (no estocásticos) se caracterizan por la existencia de un umbral, por arriba del cual la gravedad del efecto es función de la dosis, en tanto que es improbable que aparezcan por debajo de esos valores. El umbral varía, para un efecto dado, según los individuos y las condiciones de exposición. En general, estos efectos se manifiestan en poco tiempo. La respuesta a la radiación ionizante varía de acuerdo al tejido; entre lo tejidos más radiosensibles están los ovarios y testículos, médula ósea y cristalino del ojo.

A.4.7 Límites de dosis.

En el Título Tercero del Sistema de Limitación de Dosis, Capítulo I, en las Disposiciones Generales del Reglamento General de Seguridad Radiológica se tiene lo siguiente:

Artículo 7°.- Las dosis recibidas a consecuencia de la exposición a fuentes y de radiación ionizante y de prácticas, que entrañan la irradiación con radiación ionizante o incorporación de material radioactivo, se sujetarán a un sistema de limitación de dosis cuyos fundamentos son:

- *No se aprobará ninguna práctica a menos que su aplicación produzca un beneficio neto positivo.*
- *El diseño, planificación, uso y aplicación subsiguiente de las fuentes y prácticas, deberán realizarse de manera que aseguren que las exposiciones se mantengan tan bajas como razonablemente pueda lograrse, teniendo en cuenta factores sociales y económicos.*
- *El establecimiento de límites para equivalente de dosis.*

Artículo 8°.- El sistema de limitación de dosis tiene como finalidad evitar los efectos no estocásticos y limitar la ocurrencia de los estocásticos a un nivel aceptable, por lo que se establecen límites para cada caso, debiendo aplicarse el que resulte más restrictivo para el órgano o tejido irradiado.

Lo escrito anteriormente es lo publicado en el Diario Oficial de la Federación y como se puede ver se tienen y establecen límites muy estrictos con respecto a la radiación ionizante.

Puede decirse que un límite es el valor de una magnitud que no ha de ser superado. Un nivel de referencia no es un límite, sino un valor de la magnitud que sirve para decidir una conducta adecuada. Los límites podrán ser primarios, secundarios, derivados y autorizados.

Límites primarios.- Se aplican al equivalente de dosis, que es la magnitud que cuantifica el posible efecto deletéreo para la salud.

Límites secundarios.- Se usan cuando no se puede aplicar directamente el límite primario; por ejemplo, se aplican a la cantidad de un radionúclido incorporada a un organismo.

Límites derivados.- Se relacionan con los límites primarios mediante un modelo definido, tal que si se satisfacen los límites derivados es casi seguro que se satisfacen los límites primarios; por ejemplo, la concentración de un radionúclido en el aire.

Límites autorizados.- Son los que establece la autoridad competente para cualquier magnitud y, en general, son menores a los límites primario o los derivados.

Límite para trabajadores.- El límite de equivalente de dosis efectivo anual para personal ocupacionalmente expuesto (POE) es de 50 mSv (5 rem) para los efectos estocásticos. El límite anual de equivalente de dosis para los efectos determinísticos (no estocásticos) es de 500 mSv (50 rem) para los distintos órganos y tejidos, excepto para el cristalino, para el cual es de 150 mSv (15 rem).

Límites para el público.- El límite de equivalente de dosis efectiva anual para individuos del público es de 5 mSv (0.5 rem) para los efectos estocásticos. El límite anual de equivalente de dosis para los efectos determinísticos (no estocásticos) es de 50 mSv (5 rem). Cuando los individuos del público puedan estar expuestos por períodos prolongados (años), el valor medio anual del equivalente de dosis efectivo se procurará que sea de 1 mSv (0.1 rem).

A.5 Dosimetría.

La dosimetría es la acción de poder cuantificar las medidas en la emisión de algún tipo de energía radiactiva. Se le llama dosimetría de la radiación ionizante o simplemente dosimetría. Cuando la radiación ionizante pasa a través de la materia se producen interacciones con los átomos y las moléculas constitutivas de este medio, resultando ionizaciones y excitaciones.

Los efectos de la radiación se cuantifican en términos de las unidades definidas por la Comisión Internacional de Unidades Radiológicas (CIUR). A continuación se presentan las unidades más comúnmente empleadas, haciendo referencia a las unidades del Sistema Internacional y su equivalencia con las unidades tradicionalmente empleadas.

A.5.1 Unidad de actividad de una fuente.

La unidad de actividad de material radioactivo, en el Sistema Internacional (SI), se le denomina becquerel, simbolizado por Bq, y definida como:

1 becquerel (Bq) = 1 desintegración por segundo.

1 becquerel (Bq) = $2.7 \cdot 10^{-11}$ Ci

Tradicionalmente, la actividad de un material radioactivo se medía en curie, simbolizado por Ci y que tiene una gran importancia histórica. El curie, originalmente fue definido como la actividad de un gramo de radio-226, posteriormente se definió como:

1 curie (Ci) = $3.7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones por segundo

1 curie = $3.7 \cdot 10^{10}$ becquerel

A.5.2 Unidad de exposición.

La unidad de exposición indica el poder ionizante asociado al flujo de fotones (rayos X y gamma), que relaciona la cantidad de energía transferida por la radiación electromagnética a una unidad de masa de aire. Se seleccionó el aire por tener un coeficiente de absorción cercano al tejido muscular, y por la facilidad de construir equipos con cámaras de ionización de aire. Una unidad de exposición se define como:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (4.1)$$

Donde:

X = Unidad de exposición

dQ = Valor absoluto de la carga total de iones

dm = Diferencial de masa

Donde dQ es el valor absoluto de la carga total de iones de un solo signo producidos en aire, cuando todos los electrones liberados por los fotones dentro de un volumen elemental de aire, de masa dm , son detenidos completamente, aunque no necesariamente en el elemento de volumen.

A.5.3 Unidad de exposición (C/kg). Es la cantidad de radiación X o gamma que produce, en un kilogramo de aire seco a condiciones estándar (0° C y 760 mmHg), una cantidad de iones cuya carga total es un coulomb de cada signo.

1 Unidad de exposición = 1 C/Kg aire a condiciones estándar)

Puesto que la energía promedio disipada en la producción de un par de iones en el aire es de 34 eV, se tiene que:

$$1 \frac{C}{Kg} = \frac{1}{Kg_aire} * \frac{1_ion}{1.6*10^{-19}C} * 34 \frac{eV}{ion} * 1.6*10^{-19} \frac{J}{eV} = 34 \frac{J}{Kg_aire} \quad (4.2)$$

$$1 \frac{C}{Kg} = 34 \frac{J}{Kg_aire}$$

La unidad de exposición de rayos X, originalmente se denominó roentgen, y se simbolizó por "r". El roentgen se define como la cantidad de radiación electromagnética (rayos X o gama) que produce en un cm³ de aire, seco, a presión y temperatura normales (0.001293 g) la formación de par de iones que transportan una carga total de 1 esu para cada signo.

Haciendo un análisis dimensional y empleando los factores de conversión correspondientes se tiene:

$$1 \frac{C}{Kg} = 3876_r$$

$$1 r = 2.58*10^{-4} CKg^{-1}$$

A.5.4 Unidad de dosis absorbida.

La propiedad fundamental en la disimetría para la protección radiológica es la dosis absorbida (D). Esta energía absorbida por unidad de masa y su unidad es el joule por kilogramo, que tiene el nombre especial de Gray (Gy).

El uso del promedio de dosis como un indicador de la probabilidad de subsecuentes efectos estocásticos depende de la linealidad de la relación entre la probabilidad de inducir un efecto y la dosis. La relación dosis-respuesta no es lineal para los efectos determinísticos, a menos que la dosis sea uniforme distributiva sobre el tejido u órgano. La expresión para obtener la rapidez de dosis absorbida es:

$$\dot{D} = \phi \times \frac{\mu_{\text{tejido}}}{\rho_{\text{tejido}}} \times 1.6 \times 10^{-13} \times \frac{\text{actividad}}{\text{dis tan cia}^2} = \left(\frac{\text{Gy}}{\text{s}} \right)$$

A.5.5 Unidad de equivalente de dosis.

La dosis absorbida (D) es insuficiente para predecir la severidad del daño sobre la salud, resultante de una exposición dada, puesto que no todas las radiaciones producen el mismo efecto biológico para una misma dosis absorbida. El equivalente de dosis especifica el efecto biológico de un tipo particular de radiación. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad correspondiente al equivalente de dosis es el Sievert, Sv.

El equivalente de dosis (H) considera la dosis absorbida (D) ponderada por el Factor de Calidad (Q) y por el producto de todos los otros factores de ponderación (N), tales como la distribución no uniforme de la radiación a cuerpo entero. Al factor de calidad se le ha asignado el valor de 1 para la radiación gama, los valores para otros tipos de radiación se relacionan con éste, de acuerdo a sus densidades de ionización.

El equivalente de dosis (también es una propiedad puntual) está definida por:

$$H[\text{Sv}] = D[\text{Gy}] \times Q \times N$$

Hasta 1980 se empleaba el rem, cuya equivalencia con el sievert está dada por:

$$100 \text{ rem} = 1 \text{ Joule/Kg} = 1 \text{ Sv}$$

El factor de calidad (Q) pretende incluir el factor de la distribución macroscópica de la energía absorbida sobre el detrimento. Se define en función del frenamiento por colisión. Para la mayoría de los propósitos prácticos se pueden usar los siguientes valores aproximados, tanto para radiación interna como externa.

<i>Tipo de radiación</i>	Q
Rayos gama, rayos X, rayos beta y electrones	1
Neutrones térmicos	2.3
Neutrones rápidos y protones	10
Partículas alfa y partículas con carga múltiple	20

A.5.6 Rapidez de equivalente de dosis.

La rapidez de equivalente de dosis (\dot{H}) es el cociente de dH entre dt , donde dH es el incremento del equivalente de dosis en el intervalo de tiempo dt . La unidad que aquí se emplea es $\text{JKg}^{-1}\text{s}^{-1}$

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt}$$

A.5.7 Exposición.

La exposición, x , es el coeficiente de dQ entre dm . Donde dQ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo, producidos en el aire cuando todos los electrones (+ y -) liberados por fotones en una masa de aire dm se frenan completamente en el aire.

$$x = \frac{dQ}{dm}$$

Unidad empleada : Coulomb/Kg = CKg⁻¹

A.5.8 Rapidez de exposición.

La rapidez de exposición es el cociente de dx entre dt , donde dx es el incremento de exposición en el intervalo dt .

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}$$

La unidad empleada para cuantificar la rapidez de exposición es: CKg⁻¹s⁻¹

La rapidez de exposición se relaciona fácilmente con la actividad (A) de la fuente, si se conoce la constante específica de la radiación gama (Γ).

$$\dot{x} = \frac{\Gamma \times A}{r^2}$$

Donde r es la distancia entre la fuente radiactiva y el punto de interés.

A.5.9 Dosis absorbida.

La dosis absorbida (D) es el cociente dE entre dm , donde dE es la energía promedio depositada por la radiación ionizante en una porción de la materia con masa dm .

$$D = \frac{dE}{dm}$$

La unidad empleada para cuantificar la dosis absorbida es: JKg^{-1} . El nombre especial para esta unidad es el Gray (Gy).

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ JKg}^{-1}$$

Puede usarse temporalmente la unidad especial rad.

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg g}^{-1} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

A.6 Reglamentación de las fuentes de radiación ionizante.

A continuación mencionaré algunos artículos que se encuentran en el Reglamento General de Seguridad Radiológica que se refieren al manejo en general del material ionizante.

A.6.1 Generalidades. Disposiciones Generales.

Artículo 58.- Para los efectos de este Reglamento, los materiales radioactivos se clasifican en fuentes selladas y abiertas. Ninguna fuente de radiación sujeta a licencia podrá ser transferida a terceros, a menos que el receptor cuente con la licencia respectiva y la Comisión autorice la transferencia.

Por último mencionaremos algunos artículos importantes que se refieren a los permisos, se mostrarán los más representativos para tener conocimiento de lo que en este Reglamento se estipula en cuanto a material radioactivo.

A.6.2 Autorizaciones, permisos y licencias para manejo de material radioactivo.

Título Décimo. De las autorizaciones, permisos y licencias.

Capítulo I. De las autorizaciones.

Artículo 189.- Queda prohibida cualquier actividad con fuentes de radiación ionizante cuando se carezca de la autorización, permiso o licencia respectivos.

Artículo 190.- Para solicitar una autorización de adquisición, importación, exportación, posesión, uso, transferencia, transporte, almacenamiento y destino o disposición oficial de material radioactivo y dispositivos generadores de radiación ionizante, el interesado deberá presentar ante la Comisión la documentación e información que se señala para cada caso en este Reglamento, en papel membretado de la empresa o institución solicitante, y debidamente firmados por el representante legal y el candidato propuesto para encargado de seguridad radiológica de dicha empresa o institución.

Como se podrá ver la solicitud de licencias y permisos es un trámite que requiere de mucha atención, ya que para cada una de las actividades que existen con el materia radioactivo, se debe de tener un tipo de licencia especial. Los requisitos para la obtención de las licencias se exponen en las Figuras 4.1 y 4.2 que anteriormente se mostraron.

Obviamente para cada tipo de licencia se piden requisitos específicos. Para mayor información, se recomienda acudir a las oficinas de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

A.6.3 Recomendaciones generales para el embarque y manejo de materiales radioactivos.

Las regulaciones de embarques se diseñan para prevenir daños por radiación a personas bajo circunstancias ajenas a la radiación; sin bien no garantizan la exclusión del daño de la radiación en el hombre en caso de un accidente, sí preveen esta circunstancia. Algunas recomendaciones generales e importantes para el embarque de material radioactivo, se indican a continuación:

- *El recipiente no será menor de 10 cm en su medida exterior más corta. Esto es para evitar que una persona lo coloque en su bolsillo.*
- *El recipiente será resistente y del tipo aprobado por la IAEA (Agencia Internacional de Energía Atómica), para evitar derrames que ocasionen contaminación radiactiva durante el embarque.*
- *Un solo recipiente no debe contener material radioactivo con actividades mayor de dos curies de Radio, Polonio u otros miembros de la familia del Radio, y no más de 2.7 curies de cualquier otra sustancia radiactiva. Con precauciones específicas de embarque, se permiten envíos de material radioactivo con actividad de mayor de 300 curies de Cesio-137 sólido, Cobalto-60, Oro-198 o Iridio-192 en un recipiente exterior que deberá ser resistente a choques y al fuego.*
- *La superficie del recipiente no debe presentar contaminación radiactiva. El monitoreo debe reportar valores menores de 1 $\mu\text{Gy/h}$ (0.1 mrad/h) de radiación β o γ y menores de 500 desintegraciones/minuto de radiación α , medida en 100 cm^2 de superficie.*
- *La dosis en cualquier superficie accesible no deberá exceder a 2 mSv/h (200 mr/h).*
- *La rapidez de exposición a un metro no debe ser mayor de 1 mSv/h (100 mr/h).*

- *Los embarques pueden efectuarse por ferrocarril, camión, avión, barco o automóvil privado. Todos los embarques caen dentro de 4 clases o en grupos de I, II, III y exentos.*

El grupo I comprende materiales radioactivos emisores gamma o bien, emisores alfa, beta y gamma combinados. El grupo II incluye materiales emisores de neutrones, o bien de neutrones y otros tipos de radiación. El grupo III incluye a los materiales que emiten únicamente partículas eléctricamente cargadas o bien emisores gamma, X y de Bremsstrahlung, blindadas en tal forma que la dosis en la superficie del recipiente no sea mayor de 10 mr/día en cualquier momento durante el embarque.

Sin duda el tema de la normatividad y seguridad en materia de sustancias radiactivas es de vital importancia debido a los riesgos y complicaciones que éstos pueden acarrear, por esto se realizó este apéndice para estar informados quiénes son los encargados de esto en nuestro país y qué debemos hacer para poder estar en contacto de los materiales radioactivos que, hoy en día, son de mucha ayuda en la industria petrolera.