

4  
2ej.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO



FACULTAD DE INGENIERIA

USO DE TRAZADORES RADIOACTIVOS EN LA  
CARACTERIZACION DE YACIMIENTOS PETROLEROS.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A N :  
ANDRES CARVAJAL SOLANO  
NORMA B. MORALES LUNA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

CIUDAD UNIVERSITARIA,

1994





Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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-070

**SRES. ANDRES CARVAJAL SOLANO Y  
NORMA BENIGNA MORALES LUNA**  
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. I. Raúl León Ventura, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de ingeniero petrolero:

**USO DE TRAZADORES RADIOACTIVOS EN LA CARACTERIZACION DE  
YACIMIENTOS PETROLEROS**

- RESUMEN**
- I INTRODUCCION**
  - II CONCEPTOS BASICOS DE RADIOACTIVIDAD**
  - III FLUJO DE TRAZADORES RADIOACTIVOS A TRAVES DE MEDIOS POROSOS**
  - IV SECUENCIA DEL ESTUDIO DE MULTITRAZADO PARA LA CARACTERIZACION DE YACIMIENTOS PETROLEROS**
  - V APLICACION DE LA RADIOACTIVIDAD EN LA INGENIERIA PETROLERA**
  - VI CONCLUSIONES  
NOMENCLATURA  
BIBLIOGRAFIA**

Ruego a ustedes 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 les 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.

A t e n t a m e n t e

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Ciudad Universitaria, a 28 de septiembre de 1993.

EL DIRECTOR

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS\*EGLM\*ggg\*



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TEMA DE TESIS:

[REDACTED]

REALIZADA POR:

CUENTA N°

ANDRES CARVAJAL SOLANO

8538673-0

NORMA BENIGNA MORALES LUNA

8414433-5

FIRMAS DE CONFORMIDAD DEL JURADO:

PRESIDENTE: ING. SALVADOR MACIAS HERRERA

VOCAL: M.I. RAUL LEON VENTURA

SECRETARIO: M.I. RAFAEL RODRIGUEZ NIETO

1er. SUPLENTE: ING. ROBERTO PADILLA SIXTO

2do. SUPLENTE: ING. JAVIER MOLINA OCAMPO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 1994.

**A nuestra Universidad:**

**Universidad Nacional Autónoma de México**

**A nuestra Escuela:**

**Facultad de Ingeniería**

**A todos y cada uno de nuestros profesores**

**GRACIAS.**

## AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

Al M. I. Raúl León Ventura

Por su magnífica dirección y sus oportunos consejos a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Al Lic. José Luis Manuel Cabrera

Por su asesoría técnica y por el material de apoyo proporcionado.

Al M. I. Rafael de los Angeles Herrera

Al Ing. José Luis Martínez Galván

Por la facilidad que proporcionaron en el uso del equipo de cómputo.

A todas aquellas personas que colaboraron para una mejor presentación de este trabajo.

GRACIAS.

# CONTENIDO

## RESUMEN

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

1

## CAPITULO II

### CONCEPTOS BASICOS DE LA RADIOACTIVIDAD

3

#### II.1 LA RADIOACTIVIDAD Y SU DESCUBRIMIENTO

3

a) ESTRUCTURA DEL ATOMO

4

b) EMISION DE RADIACIONES

7

c) DECAIMIENTO RADIOACTIVO Y VELOCIDAD DE  
DESINTEGRACION

9

d) VIDA MEDIA

11

e) CONSTANTE DE DECAIMIENTO

14

f) ACTIVIDAD ESPECIFICA, EL CURIE Y UNIDADES

14

#### II.2 ¿QUE ES UN TRAZADOR?

16

a) TRAZADORES RADIOACTIVOS ARTIFICIALES

16

b) TRAZADORES ACTIVABLES

17

c) TRAZADORES RADIOACTIVOS NATURALES

19

d) ISOTOPOS ESTABLES

20

e) RADIOISOTOPOS MAS COMUNES EMPLEADOS EN LA  
INDUSTRIA PETROLERA

20

#### II.3 DETECCION DE LA RADIOACTIVIDAD

22

a) CAMARA DE IONIZACION

23

b) DETECTOR PROPORCIONAL

23

c) DETECTOR GEIGER-MULLER

23

d) DETECTOR SEMICONDUCTOR	26
e) DETECTOR DE CENTELLEO	26
<b>II.4 SEGURIDAD</b>	<b>29</b>
a) MAGNITUDES Y UNIDADES USADAS EN SEGURIDAD RADIOLOGICA	31
b) EFECTOS BIOLOGICOS CAUSADOS POR LA RADIACION IONIZANTE	34
c) RECOMENDACIONES Y PRECAUCIONES GENERALES PARA EL USO DE MATERIAL RADIOACTIVO	35
<b>II.5 FUNCIONES Y SERVICIOS DE LA COMISION NACIONAL DE SEGURIDAD NUCLEAR Y SALVAGUARDIAS</b>	<b>37</b>
a) ANTECEDENTES	37
b) FUNCIONES	41
c) REQUISITOS PARA LA IMPORTACION DE MATERIAL RADIOACTIVO	42
d) ESPECIFICACIONES DE LOS REQUISITOS PARA LA IMPORTACION DE MATERIAL RADIOACTIVO	43
 <b>CAPITULO III</b>	
<b>FLUJO DE TRAZADORES RADIOACTIVOS A TRAVES DE MEDIOS POROSOS</b>	<b>48</b>
<b>III.1 FENOMENO DE DISPERSION HIDRODINAMICA</b>	<b>48</b>
III.1.1 PROCESO DE DIFUSION EN FLUIDOS NO-HOMOGENEOS	49
III.1.2 DISPERSION EN FLUJO TURBULENTO	53
a) DISPERSION LONGITUDINAL	53



b) DISPERSION TRANSVERSAL	55
III.2 ECUACION GENERAL DE DISPERSION	59
III.2.1 ECUACION DE DISPERSION EN FLUIDOS NO-HOMOGENEOS	59
III.2.2 SOLUCIONES ANALITICAS DE LA ECUACION DE DISPERSION	65
a) SOLUCION DE A. OGATA	65
b) SOLUCION DE HOLLY-GUIMASSO-ESSINGTON	70
III.3 MODELOS REPRESENTATIVOS DE MEDIOS POROSOS HOMOGENEOS	80
a) MODELO DE DIFUSION DE GERSHON	80
b) MODELO DE DIFUSION DE BRIGHAM	82
c) MODELO DE BRIGHAM Y SMITH	90
III.4 MODELOS REPRESENTATIVOS DE MEDIOS POROSOS CON FRACTURAS NATURALES	95
a) MODELO DE TANG Y ASOCIADOS	95
b) MODELO DE JENSEN Y HORNE	98
c) MODELO BIDIMENSIONAL DE WALKUP Y HORNE	100

## CAPITULO IV

SECUENCIA DEL ESTUDIO DE MULTITRAZADO PARA LA CARACTERIZACION DE YACIMIENTOS PETROLEROS	102
IV.1 INFORMACION DEL YACIMIENTO EN ESTUDIO DE RADIOTRAZADO	102
IV.1.1 IMPORTANCIA DE LA GEOLOGIA DE EXPLOTACION	102

IV.1.2 RECUPERACION SECUNDARIA DE HIDROCARBIOS	103
IV.2 TIPOS DE ARREGLOS DE POZOS DE UN CAMPO PETROLERO	104
IV.3 INFORMACION DEL YACIMIENTO REQUERIDA PARA LA PLANEACION DE UN ESTUDIO DE RADIOTRAZADO	106
a) CARACTERISTICAS DEL YACIMIENTO	110
b) MAPAS Y DIAGRAMAS	110
c) INFORMACION GENERAL DEL CAMPO	110
IV.4 RADIOTRAZADO EN UN CAMPO PETROLERO	111
IV.5 ASPECTOS IMPORTANTES EN LOS PROGRAMAS DE RADIOTRAZADO	112
ELECCION DEL TRAZADOR	112
a) VIDA MEDIA	114
b) ACTIVIDAD ESPECIFICA	114
c) TIPO Y ENERGIA	114
d) COMPORTAMIENTO FISICO-QUINICO	114
e) OTROS ASPECTOS	114
IV.6 EQUIPO DE INYECCION Y DISPOSITIVOS	115
IV.6.1 BATERIA DE INYECCION DE AGUA	115
a) CAPTACION	115
b) TRATAMIENTO	115
c) BOMBEO	115
d) DISTRIBUCION	117
IV.6.2 ARBOL DE VALVULAS (POZOS)	117
IV.6.3 DISPOSITIVOS PARA INYECCION	117

IV.6.4 HERRAMIENTA DE INYECCION DE TRAZADORES	120
IV.6.5 DISPOSITIVO PARA RECOLECCION DE MUESTRAS	123
IV.7 ELECCION DEL PUNTO DE INYECCION	123
IV.8 SELECCION DE POZOS DE MUESTREO	124
IV.8.1 MUESTREO	124
a) PREVIO AL ESTUDIO	124
b) DURANTE EL ESTUDIO	125
IV.8.2 VOLUMEN DE LAS MUESTRAS	125
IV.9 ETAPAS DE UN ESTUDIO DE RADIOTRAZADO	125
IV.10 ANALISIS DE LAS MUESTRAS	127
a) LABORATORIO EN EL CAMPO (ANALISIS QUIMICO)	127
b) LABORATORIO DE RADIOQUINICA (ANALISIS RADIOQUIMICO)	127
c) LABORATORIO DE CONTEO DE BAJO NIVEL (ANALISIS RADIOQUIMICO)	128

## CAPITULO V

APLICACION DE LA RADIOACTIVIDAD EN LA INGENIERIA PETROLERA	130
V.1 INFORMACION DEL CAMPO Y ARREGLO DE POZOS	130
V.2 SELECCION DEL TRAZADOR	134
V.3 PROGRAMA DE MUESTREO	136

V. 4 PROCEDIMIENTO DE INYECCION	136
V. 5 TECNICAS DE ANALISIS	138
V. 6 INTERPRETACION	139
CAPITULO VI	
CONCLUSIONES	151
NOMENCLATURA	153
BIBLIOGRAFIA	156

## RESUMEN

En este trabajo se presenta una descripción cualitativa del fenómeno de dispersión para determinar las características del yacimiento, introduciendo algunos conceptos básicos de la radioactividad para un mejor entendimiento de las bases teóricas, ecuaciones y modelos matemáticos descritos con detalle, también se presentan las soluciones analíticas de modelos matemáticos que describen el fenómeno de dispersión en una dimensión (flujo solo en la dirección longitudinal) soluciones que simulan el fenómeno de una manera simple pero que sin embargo ilustran mucho acerca de su comportamiento.

Se describe la metodología del estudio de multitrizado para la caracterización de yacimientos petroleros que consiste en una recopilación de información detallada del yacimiento, determinación del arreglo de pozos, aspectos más importantes para el radiotrazado (selección del trazador), el equipo de inyección y dispositivos, la selección de pozos de muestreo y análisis de muestras.

Por último, se presenta un ejemplo ilustrativo de la inyección de varios trazadores radioactivos en un campo del Canadá del que se determinan algunas características del yacimiento.

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

En la Industria Petrolera Mundial, a partir de 1955, han aumentado en número e importancia, las aplicaciones de la energía atómica, sobre todo desde que se inició la producción de radioisótopos en gran escala, en los modernos reactores de los centros nucleares.

Las aplicaciones en la industria del petróleo abarcan una gran variedad de actividades que comprenden: la Exploración Geofísica, Perforación, Explotación, Transporte, Almacenamiento y Refinación del Petróleo y sus Derivados, Transformaciones Petroquímicas, así como el Control de Calidad de Productos Elaborados.

El empleo de radiotrazadores se inició después de que Pierre y Marie Curie (1928) realizaron una serie de experimentos, habiendo encontrado que la pechblenda, al emitir rayos Becquerels, era activa. Los Físicos Curie trataron químicamente una tonelada de este mineral, con la esperanza de aislar las substancias o el elemento responsable de la actividad.

La primera substancia radioactiva concentrada que aislaron fue denominada Polonio; cinco meses más tarde se consiguió la separación de una diminuta cantidad de Radio, substancia que era una fuente de rayos Becquerels; y por tanto, un elemento radioactivo.

A partir del año de 1954 se inició la inyección de agua con radiotrazadores en los Estados Unidos de Norte América; en la primera inyección realizada se utilizó un radionúclido Escandio-46 que emite rayos gamma<sup>(1)\*</sup>, para determinar perfiles de inyección y de producción.

\* Bibliografía al final del trabajo.

La técnica del radiotrazado consiste en la inyección de un elemento radioactivo disuelto en el agua de inyección, el cual es detectado utilizando el equipo adecuado, después de un determinado tiempo que puede variar de días a meses inclusive para su irrupción en los pozos de producción.

El principal objetivo de este trabajo es conocer y presentar la aplicación del trazado de radioisótopos que se desplazan dentro de un medio poroso. Se hace una recopilación de la teoría, las ecuaciones y los modelos matemáticos del fenómeno de dispersión en medios porosos. Se hace notar que con la descripción cualitativa de estas ecuaciones y modelos del comportamiento del trazador y mediante los datos obtenidos de la inyección de trazadores, es posible evaluar algunas de las características más importantes del yacimiento tales como: porosidad, permeabilidad, saturación de agua, volumen poroso inyectado, localización, tipo, y orientación de fracturas, tiempo de irrupción, trayectoria de flujo, etc.; verificando así la utilidad de las ecuaciones y modelos como otra alternativa y como una herramienta de gran valor en la caracterización de yacimientos.

## CAPITULO II

### CONCEPTOS BASICOS DE LA RADIOACTIVIDAD

#### II.1 LA RADIOACTIVIDAD Y SU DESCUBRIMIENTO

La radioactividad puede ser definida como la desintegración espontánea de uno o más átomos. En 1896 Becquerel<sup>(2)</sup> al llevar a cabo ciertos estudios sobre la luminiscencia de las sales de uranio excitadas por luz ordinaria, observó que las radiaciones luminiscentes eran capaces de reproducir las siluetas de ciertos objetos opacos, colocados sobre una placa fotográfica, aún cuando ésta se encontrara adecuadamente protegida por papel negro.

El asombroso descubrimiento de Becquerel consistió en la observación de que la radiación emitida por el uranio subsistía aún en ausencia de la luz de excitación, demostrando además que la radiación se ponía de manifiesto para todos los compuestos del uranio, en relación directa con su contenido en dicho elemento, y que tal emisión espontánea de radiación, o "radioactividad", era una propiedad del átomo de uranio en su estado normal.

Se sabe ahora que las radiaciones estudiadas por Becquerel eran electrones rápidos emitidos en la desintegración  $\beta^-$  de los productos del núcleo  $^{238}\text{U}$ .

Las primeras experiencias de Curie y Rutherford, demostraron que las radiaciones emitidas por las sustancias radioactivas contenían componentes de diferentes poderes penetrantes, como se ponía de manifiesto por su distinta absorción por la materia.

Los rayos menos penetrantes, que resultaban completamente absorbidos por algunos centímetros de aire o por una lámina metálica delgada (con un espesor del orden de 0.1 mm), fueron denominados Rayos  $\alpha$ .



Los componentes más penetrantes, que resultaban absorbidos por un espesor de 1 mm de plomo, se denominaron Rayos  $\beta$ .

En 1900 Willard<sup>(3)</sup> identificó un tercer tipo de radiación ionizante todavía más penetrante, capaz de atravesar espesores del orden de 10 cm de plomo. Estos rayos no podían ser desviados por un campo magnético y fueron denominados como Rayos  $\gamma$ .

#### a) ESTRUCTURA DEL ATOMO

Se considera al protón, neutrón y electrón como partículas básicas de las cuales toda materia está compuesta; es decir como integrantes de un átomo. El átomo se integra en dos partes: el núcleo y los electrones externos.

El núcleo ocupa un volumen muy pequeño pero constituye más del 99.9% de la masa total del átomo. Los electrones externos que circundan al núcleo ocupan la mayor parte del volumen del átomo, pero constituyen menos del 0.1% de la masa total.

El protón es una partícula con carga eléctrica positiva y tiene una masa de 1.007277 UMA (unidad de masa atómica, equivalente a 1/12 de la masa del  $^{12}\text{C}$ , es decir, igual a  $1.66 \times 10^{-24}$  gramos) contenida en el núcleo atómico cuyo número determina el número atómico (Z) y caracteriza a los diversos elementos químicos.

El neutrón es una partícula sin carga con una masa igual a 1.008665 UMA, contenida en el núcleo atómico, cuyo número (N) sumado al número atómico determina el número de masa (A).

El electrón es una partícula de masa despreciable (1/1840 de aquella del protón, igual a 0.000549 UMA), con carga eléctrica negativa y que gira en órbitas definidas en torno al núcleo atómico.

Los átomos son sistemas eléctricamente neutros, es decir, si se denomina con  $Z$  al número de cargas positivas o protones en el átomo, deberán también existir  $Z$  electrones, a fin de mantener al átomo eléctricamente neutro.

A este número  $Z$  se le conoce como "Número Atómico" y todos los átomos de un mismo elemento tendrán el mismo número atómico.

En la tabla periódica de los elementos (figura II.1) el número de casilla que ocupa cada elemento, corresponde con su número atómico, por lo que el símbolo Químico y el número  $Z$  son información redundante, al identificar a que elemento pertenece un átomo en particular. El número de neutrones que un átomo posee en su núcleo se representa por la letra  $N$  y se conoce como número neutrónico, en tanto que la suma de éstos ( $Z$  y  $N$ ) se le conoce como número másico, el cual se representa por la letra  $A$ , es decir,  $A=Z+N$ . Estos números son particularmente útiles, cuando se habla de núclidos.

Actualmente se conocen alrededor de 1500 especies nucleares, a las que se le denominan como núclidos, lo cual implica que no todos los núcleos de un mismo elemento son iguales. A fin de identificar a cuál de ellos se hace referencia, se ha desarrollado la notación siguiente (Notación Americana):



La letra  $E$  representa el símbolo Químico del elemento.

Dentro del conjunto de los núclidos, existen subconjuntos o familias de núclidos con alguna característica en común, como son:

- 1) Familia de los isótopos ( $Z$ =constante). Son núclidos de igual número atómico, pero con número másico distinto. Gráficamente ocupan líneas horizontales en la carta de los núclidos (figura II.2).



- 2) Familia de los isótonos ( $N=\text{constante}$ ). Son núclidos con el mismo número de neutrones, pero diferente número atómico. Representados por líneas verticales en la carta de los núclidos (figura II.2).
- 3) Familia de los isóbaros ( $A=\text{constante}$ ). Son núclidos de igual número másico pero diferente número atómico. Siguen líneas rectas con pendientes  $-1$  en la carta de los núclidos (figura II.2).
- 4) Familia de los isodiáferos ( $Z-N=\text{constante}$ ). Son núclidos con la misma diferencia  $Z-N$ . Siguen líneas rectas con pendiente  $+1$  en la carta de los núclidos (figura II.2).

#### b) EMISION DE RADIACIONES

La materia es radioactiva cuando los núcleos atómicos emiten partículas subnucleares o radiación electromagnética, teniendo lugar un intercambio de energía al mismo tiempo.

Las radiaciones emitidas por el núcleo atómico son de cuatro especies:

- Partículas  $\alpha$ : Son partículas extremadamente pequeñas de un átomo, la cual es disparada por una sustancia radioactiva (como radio o uranio) conforme se va desintegrando. Consisten de 2 neutrones asociados con protones, que pueden ser considerados como núcleos de átomos de helio. Tienen una masa de 4 UMA y 2 cargas positivas, es una partícula relativamente lenta, pesada y altamente ionizante.

- Partículas  $\beta$ : Son productos del decaimiento radioactivo de algunos isótopos, con la naturaleza de un electrón de alta velocidad. Son de masa despreciable y presentan carga negativa ( $\beta^-$  o negatrón) y positiva ( $\beta^+$  o positrón).



La partícula  $\beta^-$  o negatrón, es un electrón emitido por el núcleo, el cual aumenta una unidad su carga positiva al transformar un neutrón en protón.

La partícula  $\beta^+$  o positrón, es emitida cuando un protón se transforma en neutrón y una partícula de la misma masa que el electrón, pero con carga positiva, es emitida por el núcleo.

- Rayos  $\gamma$ : Son radiaciones electromagnéticas similares a los rayos x, la luz u ondas de radio, pero con mucho menor longitud de onda y en consecuencia mucho mayor energía; no tienen carga eléctrica, lo cual significa que no son influenciados por campos eléctricos y por lo tanto viajarán en líneas rectas.

Cada isótopo productor de rayos gamma emite rayos de uno o más energía específica.

- Neutrones: Son partículas sin carga, teniendo una masa de aproximadamente 1 UMA. Estos pueden llegar a penetrar fácilmente y también son absorbidos eficientemente por algunos de los elementos más livianos, particularmente hidrógeno.

#### c) DECAIMIENTO RADIOACTIVO Y VELOCIDAD DE DESINTEGRACION

Cuando un núcleo atómico emite una partícula alfa, beta, rayo gamma, o cualquier otra partícula, o captura un electrón de las capas electrónicas aledañas al núcleo, se dice que se tiene un proceso de decaimiento radioactivo.

Cada núcleo radioactivo de un radioisótopo particular tiene la misma probabilidad de desintegración en la unidad de tiempo.

Esta probabilidad de desintegración por unidad de tiempo es una constante de decaimiento, que se designa por el símbolo  $\lambda$ , característica para cada especie radioactiva.

Si a un tiempo dado  $t_0$  existen  $N$  átomos radioactivos, y  $dN$  de estos átomos decaen en un tiempo  $dt$ , se tiene que:

$$dN = -\lambda N dt \quad (\text{II.1})$$

el signo negativo significa que se trata de una desintegración, de una "desaparición" con el tiempo.

Siendo ésta la ecuación fundamental de decaimiento radioactivo:

$$dN/dt = -\lambda N \quad (\text{II.2})$$

donde la ecuación II.2 representa el número de núcleos radioactivos que decaen en la unidad de tiempo emitiendo radiaciones. La rapidez o velocidad de desintegración, o decaimiento. También Actividad o Radioactividad, por lo tanto:

$$f_{\text{des}}/N = -\lambda f_{\text{at}}$$

$$\ln N = -\lambda t + k$$

y para  $t=0$ :  $N=N_0$  y  $\ln N_0=k$

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0 \quad (\text{II.3})$$

que es la ecuación de una línea recta cuya pendiente es  $-\lambda$ .

Arreglando:

$$\ln N/N_0 = -\lambda t$$

$$N/N_0 = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{II.4})$$

esta ecuación es la expresión matemática de la Ley del Decaimiento Radioactivo.

En la práctica, el concepto de actividad es mucho más útil que el de núcleos desintegrados.

En efecto, es la actividad lo que se mide por medio de los contadores. La actividad se define clásicamente como la disminución del número de núcleos por unidad de tiempo, es decir:

$$A = - dN/dt = \lambda N$$

$$A_0 = dN_0/dt = -\lambda N_0$$

por tanto,

$$A/A_0 = N/N_0 = e^{-\lambda t}$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{II.5})$$

Graficando los valores de  $t$  contra  $A$ , se obtiene la curva de decaimiento característica de cada núclido como se observa en la figura II.3.

Como  $A$  es una función exponencial de  $t$ , se tiene:

$$\ln A = -\lambda t + \ln A_0 \quad (\text{II.6})$$

de modo que si se grafica  $t$  contra  $\text{Log } A$  en papel semilogarítmico, se obtiene una línea recta característica del núclido con pendiente  $-\lambda$  (figura II.4).

#### d) VIDA MEDIA

La vida media se define como el intervalo de tiempo en el cual la actividad decrece a la mitad de la inicial, se denota  $t_{1/2}$ . Como la actividad es proporcional al número de átomos presentes en la muestra que no han decaído, entonces  $t_{1/2}$  es igual al intervalo de tiempo en el cual el número de átomos no decaídos decrece a la mitad.



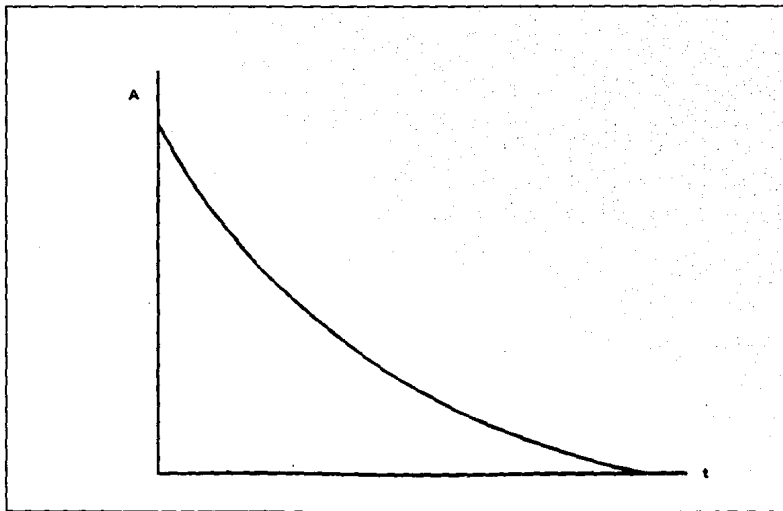


FIGURA II.3 CURVA TIPICA DE DECAIMIENTO RADIOACTIVO.

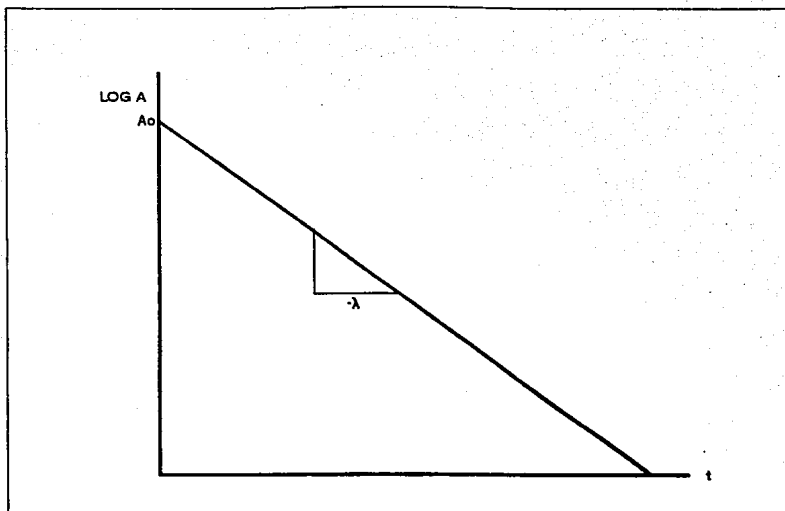


FIGURA II.4 LINEA DE DECAIMIENTO RADIOACTIVO (ECUACION II.6).

Sustituyendo  $N=N_0/2$ ,  $t=t_{1/2}$ , en la siguiente ecuación:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{II.7})$$

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$N_0/N_0 = 2 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

por tanto:

$$t_{1/2} = \ln 2/\lambda$$

$$t_{1/2} = 0.693/\lambda \quad (\text{II.8})$$

#### e) CONSTANTE DE DECAIMIENTO

La relación entre la constante de decaimiento y la vida media está dada por:

$$\lambda = 0.693/t_{1/2} \quad (\text{II.9})$$

la vida media se expresa en la unidad de tiempo que resulte más conveniente para cada elemento (segundos, minutos, horas o años).

#### f) ACTIVIDAD ESPECIFICA, EL CURIE Y UNIDADES

La actividad específica de una fuente radioactiva, está definida como la actividad por unidad de masa de un radioisótopo.

Si la muestra está libre de portador o acarreador, esto es, no está mezclada con otras especies nucleares, su actividad específica puede ser calculada como:

$$\text{Actividad Específica} = \frac{\text{Actividad}}{\text{masa}} = \frac{\lambda N}{NM / N_0} = \frac{\lambda N_0}{M} \quad (\text{II.10})$$

El Curie, es una unidad de radioactividad, que se define como cualquier cantidad de material radioactivo que sufre  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo (dps) ó  $2.22 \times 10^{12}$  desintegraciones por minuto (dpm), las cuales equivalen aproximadamente a la razón de decaimiento de un gramo de Radio ( $^{226}_{88}$  Ra). Es decir:

$$1 \text{ Ci} = 3.70 \times 10^{10} \text{ dps}$$

$$1 \text{ Ci} = 2.22 \times 10^{12} \text{ dpm}$$

Los submúltiplos utilizados son el milicurie (mCi) y el microcurie ( $\mu$ Ci) y son:

$$1 \text{ mCi} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Ci}$$

$$1 \mu\text{Ci} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ Ci}$$

Otra unidad que ha sido creada para medir la radioactividad es el Becquerel, que se abrevia Bq y se define como la cantidad de cualquier material radioactivo que sufre una desintegración por segundo; en consecuencia:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps}$$

$$1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

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

Volviendo con la actividad específica si  $N_0 = 6.023 \times 10^{23}$  y considerando la ecuación II.9 en la ecuación II.10, se tiene:

$$\text{Actividad Específica} = \frac{0.693 N_0}{t_{1/2} M}$$

$$\text{Actividad Específica} = \frac{0.693 \times 6.023 \times 10^{23}}{t_{1/2}} \times \frac{\text{Ci}}{3.7 \times 10^{10} \text{ dps}}$$

$$\text{Actividad Específica} = \frac{1.13 \times 10^{13}}{t_{1/2} M} \text{ (Ci/g)} \quad (\text{II.11})$$

Este valor está dado para una  $t_{1/2}$  en segundos.

La actividad específica está expresada en Curies por gramo, también se emplea el término  $\mu\text{Ci/ml}$ .

## II.2 ¿ QUE ES UN TRAZADOR ?

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

Entre los trazadores empleados pueden citarse los sólidos en suspensión, los trazadores químicos solubles en el medio bajo estudio, los colorantes y los elementos radioactivos.

Estos últimos serán los que se tratarán en este trabajo y se enfocará principalmente a los "Trazadores Radioactivos Artificiales".

Los trazadores pueden clasificarse en cuatro grupos principales:

1. Trazadores radioactivos artificiales
2. Trazadores activables
3. Trazadores radioactivos naturales
4. Isótopos estables

### a) TRAZADORES RADIOACTIVOS ARTIFICIALES

Son radioisótopos obtenidos en forma artificial, generalmente por medio de un reactor nuclear, y se detectan en el agua a través de la radiación que emiten. Los trazadores radioactivos artificiales tienen las siguientes ventajas:

- 1) Posibilidad de detección aún en muy bajas concentraciones (alta sensibilidad).
- 2) Posibilidad de medición "in-situ" con o sin contacto con el medio y sin interferencias de otros componentes del acuífero activos o inactivos.
- 3) Posibilidad de marcar fácilmente grandes volúmenes de agua.

- 4) Escasa contaminación del medio, tanto desde el punto de vista radiológico como químico.

y presentan las siguientes desventajas:

- 1) A veces el equipo de detección suele ser caro aunque actualmente se fabrican sistemas electrónicos portátiles de bajo costo y confiables.
- 2) El manejo puede ser complicado requiriendo de personal capacitado.
- 3) A veces la disponibilidad es escasa.
- 4) Es necesario disponer de un permiso para su trabajo.

En la Tabla II.1 se describen diferentes tipos de trazadores más usados.

#### b) TRAZADORES ACTIVABLES

En este caso se utiliza un compuesto químico no radioactivo pero que contiene algún elemento fácilmente detectable por análisis por activación (análisis químico que permite determinación y cuantificación de un elemento). El trazador debe tener una forma química adecuada para no ser absorbido por el medio. Para estudiar el movimiento de sedimentos y residuales sólidos. Estos trazadores tienen las siguientes ventajas:

- 1) Precio bajo.
- 2) Ausencia de riesgo radiológico para los usuarios.
- 3) Facilidad de transporte.
- 4) No requiere blindajes.

**TABLA II.1 CARACTERISTICAS DE TRAZADORES RADIOACTIVOS  
ARTIFICIALES MAS USADOS.**

Isótopo	Vida Media	Formula Química	Emisor	Energía (kev)
$^3\text{H}$	12.3 años	Agua Tritiada	Beta (b.e.)	18
$^{125}\text{I}$	60 días	Ioduro de Sodio	Gamma (b.e.)	35
$^{192}\text{Ir}$	74 días	Hexacloruro de Iridato	Gamma (a.e.)	317 470
$^{57}\text{Co}$	270 días	Hexacianuro de Cobalto	Gamma (a.e.)	122
$^{58}\text{Co}$	72 días	Hexacianuro de Cobalto	Gamma (a.e.)	810
$^{60}\text{Co}$	5.3 años	Hexacianuro de Cobalto	Gamma (a.e.)	1170 1330

a.e. = ALTA ENERGIA  
b.e. = BAJA ENERGIA

- 5) Facilidad de manipulación durante la inyección.

Desventajas:

- 1) Imposibilidad de medir "in-situ".
- 2) Necesidad de instrumental de elevada complejidad y alto precio.
- 3) Elevado costo de irradiación (exposición a fuentes radioactivas que recibe el organismo).

C) TRAZADORES RADIOACTIVOS NATURALES

Todas las aguas existentes en la naturaleza llevan disueltas o bien formando parte de su estructura molecular, substancias radioactivas. Algunas de ellas pueden utilizarse como trazadores naturales y tienen cuatro orígenes distintos

- 1) Miembros de las tres cadenas radioactivas ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) y los radioisótopos naturales ( $^{40}\text{K}$  y  $^{87}\text{Rb}$ ), existentes en la corteza terrestre.
- 2) Algunos isótopos que se producen en la alta atmósfera por la acción de la radiación cósmica sobre los gases allí existentes.
- 3) Actualmente las explosiones nucleares han incorporado a la atmósfera gran cantidad de radionúcleidos.
- 4) La contaminación local de las aguas a través de la evacuación de desechos radioactivos.



#### d) ISOTOPOS ESTABLES

Las concentraciones de oxígeno-18 y deuterio en una muestra de agua depende de su historia anterior desde que salió del océano. Este comportamiento característico convierte a los isótopos estables del agua en excelentes trazadores naturales de gran valor.

#### e) RADIOISOTOPOS MAS COMUNES EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA (4)

A continuación se mencionan algunas propiedades de los radioisótopos que los hacen aptos para emplearse en la Industria Petrolera.

TRITIO (H-3): Comúnmente usado como agua tritiada. Es un emisor  $\beta^-$  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.

IODO-131 (I-131): Empleando como yoduro de sodio o de metilo, o trioleína. Es emisor  $\beta^-$  de 0.61 MeV y  $\gamma$  de 0.364 y 0.637 MeV. El agua natural no lo contiene, es poco retenido. Su vida media de 8.041 días lo hace apto para trabajos menores a 30 días de duración. Es de fácil manejo y transporte.

IODO-125 (I-125): Usado como yoduro de sodio. Es emisor  $\gamma$  de 0.0354 MeV y su vida media de 59.7 días es adecuada para experiencias de mediana duración. Su comportamiento es semejante al que presenta el I-131.

BROMO-82 (Br-82): Es empleado como Bromobenceno o bromuro de metilo cuando el medio de aplicación es hidrocarburo, cuando el medio es acuoso se usa en forma de bromuro de amonio. Es emisor  $\beta^-$  de 0.44 MeV,  $\gamma$  de 0.554, 0.776 y 0.619 MeV.

No existe en el agua natural y es poco retenido por el suelo. Su vida media de 35.3 horas óptima para trabajos de corta duración. Tiene el inconveniente de requerir grandes blindajes para su transporte y su manejo es delicado.

COBALTO-60 (Co-60): Se le emplea como Hexacianuro de cobalto. Es emisor  $\beta^-$  de 0.318 MeV, y  $\gamma$  de 1.332 y 1.173 MeV. Tiene un buen comportamiento en aguas subterráneas aunque es retenido en suelos arcillosos o silíceos. Su vida media es de 5.27 años, es buena para trabajos largos. Requiere blindajes importantes que dificultan su manipulación, siendo su manejo muy delicado.

COBALTO-58 (Co-58): Empleado bajo la misma forma que la del cobalto-60, y de similar comportamiento. Apropiado para experiencias de mediana duración, ya que su vida media es de 71 días. Es emisor  $\gamma$  de 0.81 MeV y su manejo es delicado.

COBALTO-57 (Co-57): La forma química de uso y su comportamiento bajo las diferentes condiciones es semejante a la descrita para el cobalto-60. Es emisor  $\gamma$  de 0.122, 0.014 y 0.136 MeV. Su vida media es de 271 días, es adecuado para trabajos a desarrollar a largo plazo.

IRIDIO-192 (Ir-192): Usado como Hexacloruro de Iridio. Es un emisor  $\beta^-$  de 0.666 y 0.535 MeV,  $\gamma$  de 0.316 y 0.468 MeV, con una vida media de 74.2 días. Debe evitarse la presencia de sales como los sulfatos, fosfatos, oxalatos, etc., ya que interfieren o enmascaran al iridio ocasionando deficiencias en su determinación o detección. El transporte es fácil, ya que no se requiere de grandes blindajes, pero su manejo es delicado.

De los anteriores radiotrazadores, los que han demostrado ser de gran utilidad en los estudios que se realizan en los campos de recuperación secundaria a base de inyección de agua, son los cobaltos, tritio, iodo-125 e iridio-192. Su selección depende de la duración del estudio y éste a su vez de la distancia entre los pozos.

### II.3 DETECCION DE LA RADIOACTIVIDAD

El desarrollo del estudio de los radioisótopos ha sido posible gracias al avance en paralelo de la electrónica, la cual ha ido produciendo cada vez mejores instrumentos para detectar la radioactividad.

Estos instrumentos proporcionan, con variada eficiencia, datos acerca del número de núcleos que decaen por unidad de tiempo en una muestra radioactiva y de la energía de las radiaciones absorbidas por el detector.

Para ello es necesario que el tipo de detector sea escogido de acuerdo a las características de la radiación y su uso se realice en forma apropiada.

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

- 1) Recolección de iones producidos cuando las radiaciones atraviesan un gas.
- 2) Comportamiento de materiales semiconductores de corriente al ser atravesados por radiaciones.
- 3) 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. Se conocen los siguientes tipos de detectores:

a) CÁMARA DE IONIZACIÓN

El detector que opera en la región donde el voltaje resulta insuficiente para causar amplificación gaseosa es conocido como cámara de ionización, generalmente se utiliza para detectar partículas que producen una gran ionización específica tales como las partículas  $\alpha$  (figura II.5).

b) DETECTOR PROPORCIONAL

En los detectores proporcionales, el sistema de discos paralelos de las cámaras de ionización para realizar las funciones de electrodos, se reemplaza por un cilindro, cuya pared actúa como cátodo y un alambre central delgado o una pequeña esfera en el centro del mismo funciona como ánodo. Los tipos de detectores proporcionales son comúnmente operados a presión atmosférica usando una cámara a través de la cual fluye el gas ionizable compuesto por una mezcla de 90% de Argón y 10% de Metano (figura II.6). Sirven para detectar partículas  $\alpha$ ,  $\beta^-$  y Rayos X.

c) DETECTOR GEIGER-MULLER

La naturaleza de los pulsos producidos por un detector Geiger es similar a la de aquellos obtenidos de un detector proporcional, pero de una mayor amplitud, como resultado de que las avalanchas iónicas originadas por la radiación y el voltaje aplicados son mucho más grandes.

De la misma manera, los electrodos del detector Geiger-Muller están formados por la pared de un cilindro que contiene un alambre a lo largo de su eje central, el cual actúa como ánodo.

Se conocen detectores de ventana y sin ventana, sobre todo para la detección de partículas  $\alpha$  y  $\beta^-$  de baja energía, aún cuando el gran tamaño uniforme de los pulsos producidos no permitan realizar análisis de energía de la radiación como en el caso de los detectores proporcionales.

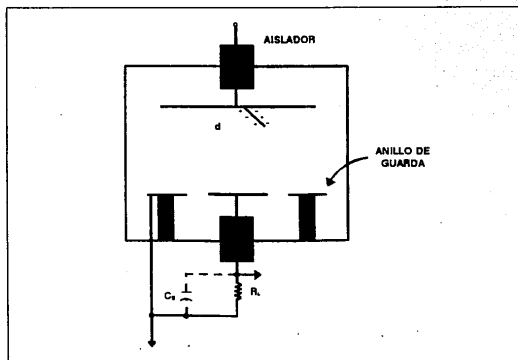


FIGURA II.5 CARACTERISTICAS GENERALES DE UNA CAMARA DE IONIZACION CON ANILLO DE GUARDA PARA DEFINIR EL CAMPO E INTERCEPTAR LA FUGA DE CORRIENTE<sup>10</sup>.

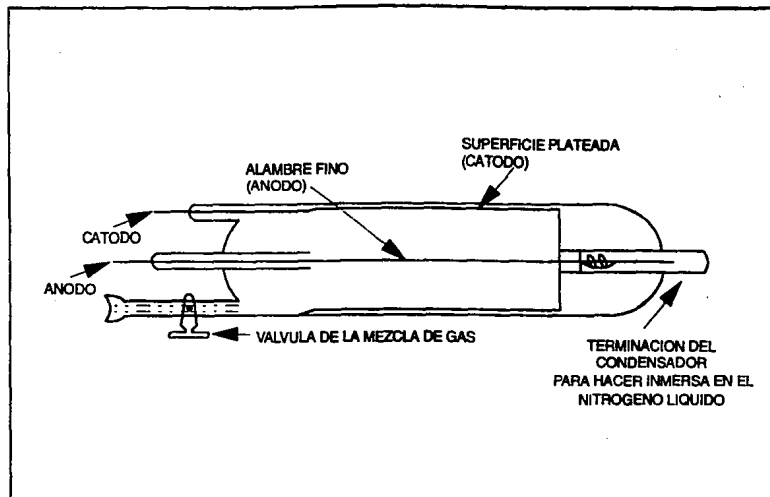


FIGURA II.6 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN DETECTOR PROPORCIONAL <sup>(1)</sup>.

En la figura II.7 se pueden observar varias formas del detector Geiger-Muller.

#### d) DETECTOR SEMICONDUCTOR

Una variedad cada vez más utilizada de detectores de radiación, hace uso de materiales sólidos que presentan una muy pobre conductividad eléctrica, siendo llamados detectores semiconductores, o con una denominación un tanto impropia detectores de estado sólido.

Actualmente los más usados son los Ge-Li (Germanio-Litio) figura II.8, Si-Li (Silicio-Litio) y Ge-hiperpuro (Germanio-hiperpuro) debido a su óptimo funcionamiento, aún cuando requieran un dispositivo que los mantenga a las bajas temperaturas necesarias a la conservación de su propiedad semiconductor. Estos son sólidos para detectar partículas gamma, tienen mejor resolución pero presentan baja eficiencia.

#### e) DETECTOR DE CENTELLEO

El detector de centelleo 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, porque la intensidad del destello luminoso que producen es directamente proporcional a la energía de la radiación, es decir, la medida de la altura del pulso es una medida de la energía de la radiación.

Se conocen tres tipos de detectores de centelleo:

- Detector de centelleo de gas
- Detector de centelleo de sólido

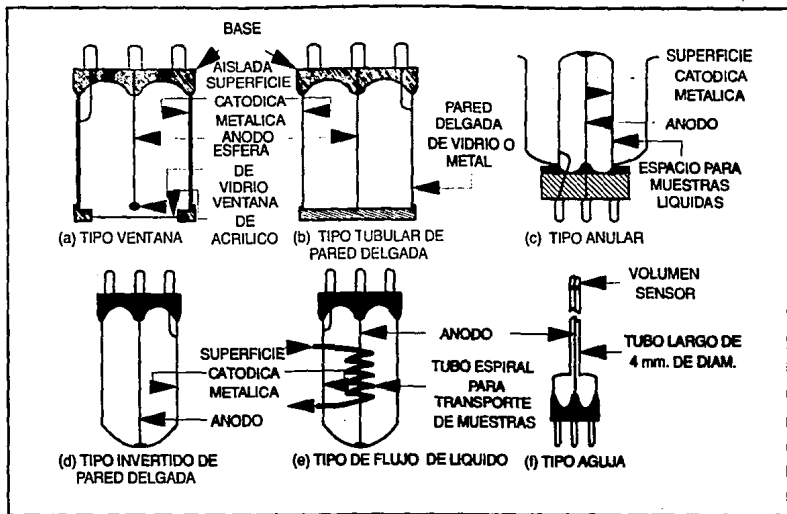


FIGURA II.7 VARIAS FORMAS DE DETECTORES GEIGER-MULLER<sup>®</sup>.



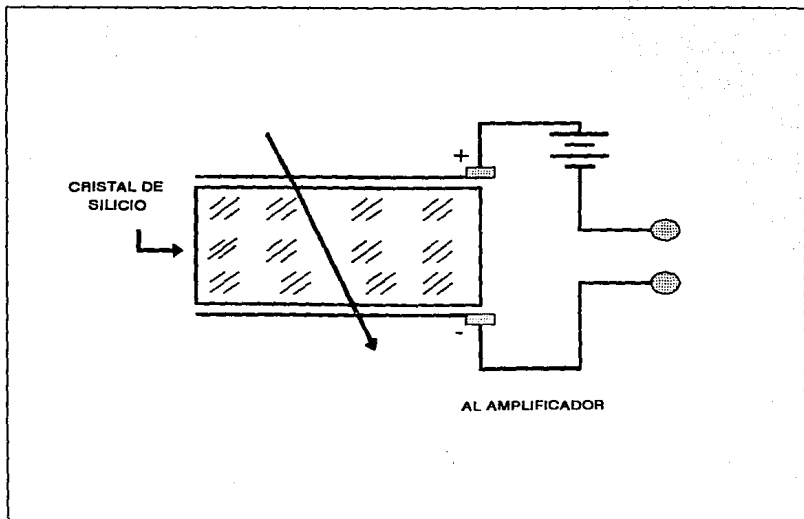


FIGURA II.8 DETECTOR DE SEMICONDUCTOR EMPLEANDO SILICIO<sup>pn</sup>.

- Detector de centelleo de líquido.

Solamente se tratará sobre el detector de centelleo líquido, ya que la detección radioactiva presenta indiscutibles ventajas cuando se trata de partículas  $\beta^-$  de baja energía. Este instrumento recolecta y transforma los destellos de luz en pulsos eléctricos por medio de un tubo fotomultiplicador (figura II.9).

El proceso general se considera como una cadena de eventos en donde la radiación excita las moléculas del solvente, en el cual transfiere la energía de excitación a las moléculas del fósforo, emitiéndose entonces el centelleo de luz azul hacia el tubo(s) fotomultiplicador(es).

#### II.4 SEGURIDAD

Uno de los aspectos más importantes relacionados directamente con la aplicación de radioisótopos en diferentes ramas de la industria e investigación científica, es la Seguridad Radiológica.

Es preciso aclarar que la humanidad siempre ha estado expuesta a la radiación ionizante, tanto de origen cósmico como de fuentes naturales que se localizan en el medio ambiente y dentro del cuerpo humano.

La exposición a la radiación natural presenta riesgos de radiación externa e interna.

La irradiación interna proviene de la ingestión de alimentos, agua y aire que contienen materiales radioactivos.

La irradiación externa es ocasionada por rayos cósmicos y por rayos gamma que emiten los materiales radioactivos que se encuentran en el aire, agua y sobre o dentro de la tierra.

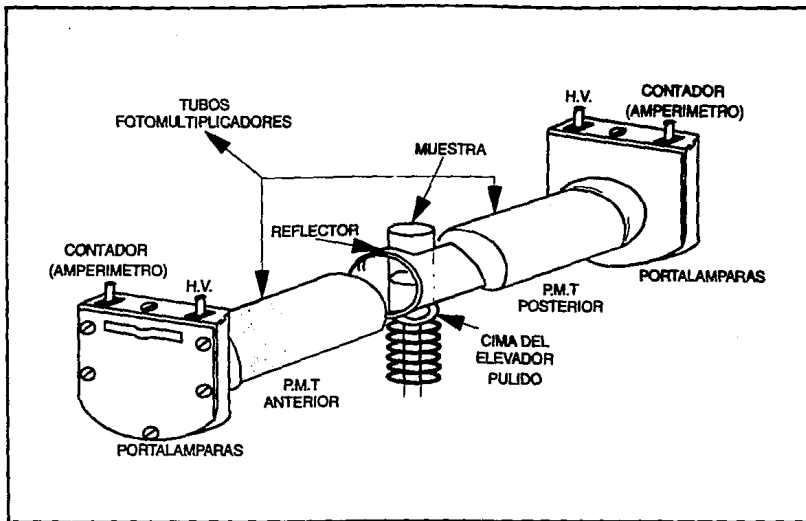


FIGURA II.9 COMPONENTES DE UN DETECTOR DE CENTELLEO LIQUIDO<sup>®</sup>.

Cualquier tipo de radiación ionizante puede producir un determinado daño biológico, pero la magnitud de la dosis necesaria para producir el mismo efecto, varía de un tipo a otro de radiación.

e) MAGNITUDES Y UNIDADES USADAS EN SEGURIDAD RADIOLOGICA

**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

$$x = dQ/dm \quad (II.12)$$

unidad: Coulomb/Kg =  $CKg^{-1}$ .

La unidad especial es el roentgen (R), que está cayendo en desuso.

$$1 R = 2.58 \times 10^{-4} CKg^{-1}$$

**Rapidez de exposición:**

La rapidez de exposición  $\dot{x}$  es el cociente de  $dx$  entre  $dt$ , donde  $dx$  es el incremento de exposición en el intervalo de tiempo  $dt$ .

$$\dot{x} = dx/dt \quad (II.13)$$

unidad:  $CKg^{-1}s^{-1}$ .

Se emplea mucho la unidad especial roentgen y otras unidades de tiempo:  $Rh^{-1}$ ,  $Rmin^{-1}$ , ect.

La rapidez de exposición se relaciona fácilmente con la actividad (A) de la fuente, si se conoce la constante específica de la radiación gamma ( $\Gamma$ ).

$$x = \Gamma A / r^2 \quad (\text{II.14})$$

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

### **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.

$$D = dE/dm \quad (\text{II.15})$$

unidad:  $\text{JKg}^{-1}$ .

El nombre especial para esta unidad es gray (Gy).

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

Puede usarse temporalmente la unidad especial rad.

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

### **Equivalentes de dosis:**

Cantidad que correlaciona mejor los efectos más importantes.

$$H = DQN \quad (\text{II.16})$$

unidad:  $\text{JKg}^{-1}$ .

Donde Q es el factor de la calidad y N es el producto de todos los demás factores modificadores (que incluye rapidez de dosis)  $N=1$ . La unidad equivalente de dosis era el rem y ahora es el Sievert (Sv).

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Joule/Kg} = 100 \text{ rem} \quad (\text{II.11})$$

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 efectivos aproximados, tanto para radiación interna como externa.

Radiación	Factor de Calidad Q
Rayos X, gamma y electrones	1.0
Neutrones, protones, etc. de energía desconocida	10.0
Partículas alfa y otras de carga múltiple de energía desconocida	20.0
Neutrones térmicos	2.3

#### 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  $dt$ .

$$\dot{H} = dH/dt \quad (\text{II.17})$$

unidad:  $\text{JKg}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

También se usa la unidad especial  $1 \text{ Sv s}^{-1} = 1 \text{ JKg}^{-1}\text{s}^{-1}$  y temporalmente puede emplearse el rem con otras unidades de tiempo,  $\text{remh}^{-1}$ , etc.

**Efectos somáticos:**

Estos efectos se manifiestan en el individuo que se ha expuesto a la radiación ionizante y pueden ser por ejemplo: esterilidad temporal o definitiva, disminución de células en la médula ósea, la inducción al cáncer, etc.

**Efectos Hereditarios o Genéticos:**

Los efectos no se presentan en el individuo expuesto, sino afectan a sus descendientes, por ejemplo alteraciones genéticas, interferencia en la organogénesis de embriones, etc.

**Efectos no Estocásticos:**

Estos efectos se caracterizan por tres cualidades: primera se debe exceder cierta dosis mínima antes de que se observe un efecto particular. Adicionalmente, la magnitud del efecto aumenta con el tamaño de la dosis. Además, existe una clara relación causal entre la exposición al agente nocivo y el efecto observado.

A dosis altas la sobrevivencia de una persona, depende de la competencia entre la reproducción y la muerte celular, por ejemplo: rupturas cromosómicas en células sanguíneas, probable retención momentánea de la espermatogénesis, probabilidad de muerte.

**Efectos Estocásticos:**

Son aquellos efectos que ocurren por casualidad; y ocurren entre la población no expuesta así como también entre individuos expuestos, estos efectos pueden ser:

- a) Inducción de leucemia.
- b) Inducción de cánceres.
- c) Enfermedades hereditarias.
- d) Acortamiento de la vida.

Todos los efectos tienen síntomas del síndrome de radiación, los cuales pueden ser: náuseas, vómitos, agotamiento, disminución de glóbulos blancos, período de recuperación aparente, diarrea con sangre, anemia.

Los efectos mencionados están en función de la magnitud de la dosis, del intervalo de tiempo en que se imparta ésta, de la energía, de la actividad y penetración de la radioactividad; así como la localización de dicha radiación en el cuerpo.

c) RECOMENDACIONES Y PRECAUCIONES GENERALES PARA EL USO DE MATERIAL RADIOACTIVO

- Las fuentes no selladas deben ser manejadas en campanas.
- Se deben de usar batas y guantes de hule.
- El material radioactivo debe ser guardado en contenedores cerrados.
- Todos los contenedores de material radioactivo debe de etiquetarse con el nombre del núclido, actividad, etc.
- Todas las superficies y dispositivos de transporte deben cubrirse con papel absorbente recubierto del lado opuesto con plástico no permeable.
- Toda salpicadura, debe ser limpiada inmediatamente.



- Se prohíbe comer, beber, fumar y holgazanear en áreas donde se maneja material radioactivo.
- Se deben usar monitores personales, dosímetros.
- Los zapatos, manos y ropa deben ser monitoriados frecuentemente.
- Usar blindaje y distancia siempre que sea necesario.
- Disponer de los desechos de radioactivos líquidos y sólidos en los contenedores aprobados que se proporcionan.
- Los refrigeradores que contengan isótopos no serán utilizados para almacenar alimentos.
- Monitorear las áreas de trabajo con radioisótopos por lo menos una vez al día.
- Lavarse completamente las manos después de manipular isótopos, antes de comer o de fumar y al terminar el trabajo.
- Mantener registros de recepción, uso, transferencia y desecho de material radioactivo.
- Reportar toda inhalación accidental, ingestión, heridas o salpicaduras (posibles contaminaciones) al supervisor y al encargado de Seguridad Radiológica.

## II.5 FUNCIONES Y SERVICIOS DE LA COMISION NACIONAL DE SEGURIDAD NUCLEAR Y SALVAGUARDIAS

### a) ANTECEDENTES

El descubridor de una nueva fuente de energía derivada de fisión nuclear, entre sus múltiples y trascendentales consecuencias, ha creado la necesidad común a todos los países, de dictar medidas legislativas que normen determinados aspectos relacionados con esta materia.

Los principales aspectos que han ameritado la expedición de leyes y reglamentos que regulen el uso de material radioactivo, se refieren a la exploración y explotación de yacimientos de materiales radioactivos, a la posesión y utilización de los mismos, a la producción y uso de la energía nuclear, a la investigación científica y, finalmente, a las medidas de protección contra los efectos perjudiciales de las diversas fuentes de radiación. Una característica fundamental de la legislación, que aparece uniformemente en las leyes promulgadas en los distintos países, es la de establecer la intervención y supervisión del Estado sobre los materiales radioactivos y otras fuentes de radiación para asegurar que estos materiales se destinen exclusivamente a usos pacíficos, evitando su desvío hacia la utilización bélica. Por otra parte, los materiales radioactivos y en general las fuentes de radiación, pueden perjudicar la salud humana y los bienes. Corresponde al Estado dictar medidas de protección contra tales riesgos, medidas que implican un control del mismo sobre dichas fuentes en beneficio de la colectividad.

Para el ejercicio de las facultades de referencia, las legislaciones de los diferentes países han creado un órgano gubernamental al que se atribuyen además las funciones adecuadas para el fomento, desarrollo y realización de la utilización pacífica de la energía nuclear.

De acuerdo con estos lineamientos generales, el Congreso de la Unión aprobó el 19 de diciembre de 1955, la ley que creaba la Comisión Nacional de la Energía Nuclear.

Después de varias derogaciones se obtiene la Ley del 26 de enero de 1979 y se publica en el Diario Oficial la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear que incorpora nuevas modificaciones.

Esta ley define a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias como un órgano desconcentrado dependiente de la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal con las siguientes atribuciones:

**1) Vigilar:**

- La aplicación de normas para que el funcionamiento de las instalaciones nucleares y radioactivas se lleven al cabo con máxima seguridad para los habitantes del país.
- El cumplimiento de las disposiciones legales y los tratados internacionales de los que México sea signatario en materia de seguridad nuclear, radiológica, física y de salvaguardias.

**2) Revisar, evaluar y, en su caso, autorizar:**

- Las bases para el emplazamiento, diseño, construcción, operación, modificación, cese de operaciones, cierre definitivo y desmantelamiento de instalaciones nucleares y radioactivas.
- Además de proponer las normas para las bases del diseño, la construcción, adaptación, preparación, operación, modificación y cese de operaciones de instalaciones para la extracción y tratamiento de minerales radioactivos, así como fijar los criterios de interpretación de las normas aludidas.

- Previamente al inicio de operaciones, los planes que para el manejo de condiciones anómalas o de emergencia deben establecerse en instalaciones nucleares y radioactivas.

### **3) Opinar, auxiliar, recomendar y asesorar:**

- Previamente a la autorización que otorgue el Secretario de Energía, Minas e Industria Paraestatal, sobre el diseño, construcción, operación, modificación, cese de operaciones, cierre definitivo y desmantelamiento de instalaciones nucleares.
- Previamente a la autorización de importaciones y exportaciones de materiales combustibles nucleares, material radioactivo y equipos que los contengan.
- En los casos en que los materiales y combustibles nucleares o materiales radioactivos sean objetos de delito, sufran pérdidas o extravío o se vean envueltos en incidentes.
- A las autoridades encargadas de la prevención, procuración y administración de justicia en los casos antes mencionados, así como a las autoridades aduaneras.

### **4) Establecer:**

- Y manejar el sistema nacional de registros y control de materiales y combustibles nucleares.
- Los requisitos que deberán satisfacer los programas de capacitación técnica sobre aspectos relacionados con la seguridad nuclear, radiológica, física y las salvaguardias.

### **5) Expedir, revalidar, reponer, modificar, suspender y revocar:**

- Los permisos y licencias requeridos para las instalaciones radioactivas.

- Y recoger y retirar en su caso los utensilios, equipos, materiales existentes y en general cualquier mueble contaminado en dichas instalaciones.

#### **6) Ordenar y practicar:**

- Auditorías, inspecciones, verificaciones, reconocimientos para comprobar el cumplimiento y observación de las disposiciones legales en materia de seguridad nuclear, radiológica, física y de salvaguardias.
- E imponer las medidas de apremio y las sanciones administrativas que procedan de acuerdo a las disposiciones de la ley y sus reglamentos.

#### **7) Requerir:**

- Y verificar la información y documentación que se estime pertinente para el ejercicio de las atribuciones que esta ley le confiere.
- El auxilio de la fuerza pública cuando fuere necesario para hacer cumplir sus determinaciones en los términos de la ley.

#### **8) Intervenir:**

- En la celebración de los convenios o acuerdos de cooperación que se realicen por la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal en materia de seguridad nuclear, radiológica, física y de salvaguardias, con otras entidades nacionales.

## b) FUNCIONES

La comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias es la autoridad que reglamenta las actividades desarrolladas para la utilización de la energía nuclear con fines pacíficos.

De acuerdo con las atribuciones que por Ley le competen, la Comisión deberá:

- Establecer normas para que, en el desarrollo de las actividades de la industria nuclear, se protejan la seguridad y la salud de los habitantes del país.
- Vigilar que en el territorio nacional se cumplan las disposiciones legales nacionales y los tratados internacionales en materia de seguridad nuclear, seguridad física, seguridad radiológica y salvaguardias, de los que México es signatario.
- Revisar, evaluar y autorizar, en su caso, las bases para el diseño, construcción, operación y modificación, para definitivo y desmantelamiento de instalaciones nucleares y/o radiactivas. Así como los planes que se establezcan para el manejo de condiciones anómalas o de emergencia.
- Establecer y mantener el sistema nacional de contabilidad para el control de los materiales nucleares y radioactivos.
- Establecer las normas de seguridad nuclear, física y radiológica para asegurar el buen funcionamiento de las instalaciones nucleares y radioactivas del país.
- Establecer las normas de protección radiológica para el manejo, transporte, posesión y uso de materiales radioactivos dentro del territorio nacional.

- Emitir opinión, previa a la autorización para la importación y exportación de material nuclear, material radioactivo y equipo que lo contenga, así como vigilar el cumplimiento de las normas aplicables.

c) REQUISITOS PARA LA IMPORTACION DE MATERIAL RADIOACTIVO

Diario de la Federación 22 de Noviembre de 1988

Artículo 192

Artículo 192.- Para solicitar autorizaciones de importación de fuentes de radiación ionizante, los interesados deberán presentar por escrito ante la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, la siguiente información:

- I) Número de la autorización, permiso o licencia de la operación del destinatario.
- II) Radioisótopos; actividad; forma física y química; y especificaciones del equipo que contiene el material radioactivo o las especificaciones del dispositivo generador de radiación ionizante.
- III) Aduana por donde se pretende efectuar la importación.
- IV) Tipo de bultos, embalajes o contenedores que utilizarán en el transporte.
- V) Copia del pedimento de importación, y
- VI) Plan de seguridad física y radiológica.

4) ESPECIFICACIONES DE LOS REQUISITOS PARA LA IMPORTACION DE MATERIAL RADIOACTIVO

Con fundamento en el Artículo 29 de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Material Nuclear, la importación de material radioactivo que va a ser utilizado en la República Mexicana, requiere de la autorización otorgada por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).

A continuación se indican los requisitos mínimos que debe cumplir el solicitante de la importación de material radioactivo. Para iniciar el trámite de una autorización para la importación, se deberá presentar ante la CNSNS:

- a) Solicitud en la forma oficial correspondiente.
- b) Número de licencia y material radioactivo que se desea importar.
- c) Tipo de bultos, embalajes o contenedores utilizados durante el uso o transporte del material radioactivo.
- d) Tipo de importación del material radioactivo.
- e) Carta de los compromisos que adquiere el importador ante la CNSNS.

**Presentación de la información**

La información que se solicita debe presentarse en el orden y con el formato que se señalará, sin omitir ningún punto. Si algún punto no es pertinente o no se aplica al caso particular de que se trate, se indicará lo anterior y se explicarán las razones.

Se usará en todos los casos el Sistema Internacional de Unidades (SI), sus símbolos y prefijos.



Si se desea usar, además, otro sistema de unidades, se incluirán las equivalencias en el Sistema Internacional.

Los datos deberán ser escritos a máquina, en tinta negra, a doble espacio, en hojas de papel bond blanco, tamaño carta y con márgenes adecuados.

Se entregarán a la Comisión por lo menos dos ejemplares de esta información.

#### **I De la solicitud de licencia**

La solicitud deberá llenarse a máquina. Los datos que se solicitan serán los siguientes:

Del Solicitante

- a) Razón social.
- b) Dirección del permisionario, indicando calle y número exterior e interior.
- c) Colonia o localidad.
- d) Delegación o Municipio.
- e) Estado y código postal.
- f) Teléfono indicando clave lada y extensión.

En caso de que la empresa tenga un representante legal, se deberá anotar:

- a) Nombre del representante legal.
- b) Dirección.
- c) Colonia o localidad.

- d) Delegación o Municipio.
- e) Estado y código postal.
- f) Teléfono, indicando clave lada y extensión.
- g) Fecha.

Del encargado de la seguridad radiológica.

- a) Nombre.
- b) Dirección, indicando calle y número exterior e interior.
- c) Colonia o localidad.
- d) Delegación o Municipio.
- e) Estado y código postal.
- f) Teléfono, indicando clave lada y extensión.

La solicitud deberá estar firmada por las personas antes referidas. Los nombres deben leerse claramente y las firmas no deberán encimarse.

#### **II Número de Licencia y Material Radioactivo que se Desea Importar**

Se debe indicar el número de licencia del permisionario, otorgada por la CNSNS, para poseer, usar, y/o almacenar el material radioactivo que se pretende importar.

Del material radioactivo que desea importarse, se deberá indicar los radioisótopos, tipo de fuente, actividad por fuente, número de fuentes, actividad total.

Para el caso de equipos que contengan fuentes de radiación, se deberá indicar la marca, el modelo y de preferencia, anexas un catálogo.

En esta parte se solicita se indique la aduana por donde se pretende importar el material radioactivo.

### **III Tipo de Bultos o Contenedores Utilizados Durante el Uso o Transporte del Material**

En esta parte se indica la clasificación del bulto y tipo de embalaje en que será enviado el material radioactivo. Conviene que el solicitante envíe copias de los certificados de aprobación del uso, contenedor y embalaje, emitidos por el órgano regulador del país de origen.

Estos datos pueden ser solicitados a la empresa que va a vender el material radioactivo.

### **IV Tipo de Importación del Material Radiactivo**

La CNSNS actualmente está emitiendo autorizaciones para las siguientes importaciones:

- a) Importación definitiva: Aquella en que el material radioactivo por importar permanecerá en el país por un período mayor a un año.
- b) Importación temporal: Aquella en que el material radioactivo permanecerá en el país por un período menor a un año, debiendo exportarse por cualquiera de los siguientes motivos:

- Las acciones con el material radioactivo han llegado a su término.

- El material radioactivo es parte integrante de un producto o equipo que ha sido elaborado, transformado o reparado en el país.

c) Importación por reposición de existencias: Aquella en que el material radioactivo sirve para reposición de fuentes radioactivas decaídas y éstas son enviadas a los proveedores.

En el caso de importación temporal, se indicará el tiempo de permanencia en el país y la forma en que será exportada la fuente.

#### **V Carta de los Compromisos que Adquiere el Importador ante la CNSNS**

En esta carta compromiso se debe indicar quién será el responsable de que el material radioactivo una vez entregado por las autoridades aduaneras, cuente con los dispositivos de seguridad radiológica aplicables hasta su destino final. Indicar también en que tiempo el destinatario deberá enviar una copia de los certificados de calibración de las fuentes radioactivas emitidas por el proveedor y copia del certificado de transporte emitido por el órgano regulador del país de origen.

## CAPITULO "'

### FLUJO DE TRAZADORES RADIOACTIVOS A TRAVES DE MEDIOS POROSOS

#### III.1 FENOMENO DE DISPERSION HIDRODINAMICA

Cuando se inyecta un en un medio poroso, el trazador se desplaza por un mecanismo de convección-difusión, llamado dispersión.

En este trabajo se hace un estudio sobre la dispersión que experimenta un trazador que se desplaza dentro del medio poroso. Como resultado se tiene que a través de la inyección de trazadores, es posible determinar algunas de las más importantes características estructurales de los yacimientos.

El transporte hidrodinámico y la dispersión en medios porosos son los fenómenos físicos más importantes en la determinación de la distribución y concentración del trazador dentro del yacimiento. Considerando un medio poroso saturado de un cierto fluido en movimiento, y si una porción del fluido contiene una cierta masa de soluto, este soluto puede ser referido como Trazador. El trazador puede ser calificado como una porción del mismo líquido, el cual puede ser identificado por las siguientes características: densidad, color, conductividad eléctrica, radioactividad, etc.

A través de experimentos se ha demostrado que el fluido que no contiene trazador comienza a ser invadido por éste, el cual empieza a extenderse gradualmente con mayor o menor rapidez dentro del fluido sin trazador, dependiendo de la dirección promedio de flujo. Este fenómeno es llamado dispersión hidrodinámica en medios porosos (dispersión, desplazamiento miscible), el cual es un proceso no-estacionario e irreversible.

La dispersión hidrodinámica es el resultado macroscópico del movimiento de las partículas individuales de trazador a través de los poros, y varios fenómenos físicos y químicos, los cuales tienen lugar dentro de los poros. En general, estos movimientos y fenómenos son el resultado de:

- a) Fuerzas externas que actúan en el fluido.
- b) La compleja geometría microscópica del sistema poroso.
- c) Difusión molecular causada por los gradientes de concentración del trazador en la dirección del flujo y transversal a ella.
- d) Variaciones en las propiedades del fluido, tales como densidad, viscosidad, las cuales afectan el patrón de flujo.
- e) Cambios en la concentración del trazador debido a los procesos químicos y físicos dentro de la fase líquida.
- f) Interacciones entre las fases líquida y sólida.

#### III.1.1 PROCESO DE DIFUSION EN FLUIDOS NO-HOMOGENEOS

En los problemas tecnológicos relacionados con mezclas de fluidos, es necesario determinar la cantidad relativa de la sustancia dada en un punto para cualquier tiempo. Por tanto, una nueva variable, la concentración, se introduce en el análisis.

Esto requiere que la ecuación de concentración de la masa (conocida como ecuación de continuidad, en un fluido homogéneo) sea reformulada para un fluido no-homogéneo.

El principio de conservación de masa debe verificarse para cada componente o especie en un fluido heterogéneo.

Por simplicidad, las discusiones siguientes se referirán siempre a un sistema binario, esto es, de dos componentes.

La difusión molecular es el proceso mediante el cual la materia se transporta por la movilidad molecular. La pérdida gradual de una frontera de separación entre líquidos diferentes, originalmente bien definida, es un ejemplo común de difusión molecular. Se reconoce que los gradientes de temperatura, de presión y los campos de fuerzas externas pueden contribuir también al flujo de masa en una escala molecular.

Si el fluido está en un estado de movimiento convectivo, debe tenerse cuidado entre movimientos laminares y turbulentos. Por ejemplo, si el flujo es turbulento el intercambio macroscópico de partículas de fluido, generalmente "eclipsará" al proceso de intercambio molecular. La difusión molecular ordinaria se llama a menudo gradiente de difusión, y puede describirse por una ley observacional, en la cual la rapidez de la transferencia de masa de una substancia, por unidad de área, es proporcional al gradiente de concentración de la substancia. Esto es conocido como la primera ley de Fick, y es análoga a la ley de Newton de la viscosidad, o a la de Fourier para la conducción del calor. Es necesario definir ciertas propiedades del fluido, y algunos parámetros cinemáticos propios de un sistema binario:

**a) Densidad:**

$$\rho_A = \frac{\text{masa del componente A}}{\text{volumen de la mezcla de A y B}} \quad (\text{III.1})$$

$$\rho_B = \frac{\text{masa del componente B}}{\text{volumen de la mezcla de A y B}} \quad (\text{III.2})$$

$$\rho_m = \frac{\text{masa de A} + \text{masa de B}}{\text{volumen de la mezcla de A y B}} \quad (\text{III.3})$$

$$\rho_m = \rho_A + \rho_B \quad (\text{III.4})$$

**b) Concentración:**

$$C_A = \frac{\text{masa del componente A}}{\text{masa de la mezcla de A y B}}$$

$$C_A = \rho_A / \rho_m \quad (\text{III.5})$$

$$C_B = \frac{\text{masa del componente B}}{\text{masa de la mezcla de A y B}}$$

$$C_B = \rho_B / \rho_m \quad (\text{III.6})$$

de lo cual se concluye que

$$C_A + C_B = 1 \quad (\text{III.7})$$

Continuando con la discusión cuantitativa del proceso de difusión, se tiene que en una mezcla los diversos componentes se mueven con diferentes velocidades. Sin embargo, esto no se refiere a las velocidades particulares de cada molécula, sino más bien a la velocidad media de todas las moléculas de un componente dado. Para el componente A, esta velocidad es  $v_A$ , y el flujo de masa del componente A por unidad de área (masa por segundo, por unidad de área), es un vector igual al producto  $\rho_A v_A$ . El área unitaria es normal a la dirección del vector velocidad. Denotando al vector flujo (relativo a coordenadas fijas) por  $N_A$ , se tiene:

$$N_A = \rho_A v_A \quad (\text{III.8})$$

El flujo de masa  $N_A$  puede interpretarse también como la cantidad de movimiento del componente A, por unidad de volumen de la mezcla. En forma similar,

$$N_B = \rho_B v_B \quad (\text{III.9})$$



La velocidad hidrodinámica local ( $v_h$ ) debe ser igual a la cantidad de movimiento total por unidad de masa de la mezcla y, por tanto,

$$\frac{\text{cantidad de movimiento total}}{\text{volumen de la mezcla}} = N_A + N_B \quad (\text{III.10})$$

y

$$\frac{\text{masa total de la mezcla}}{\text{volumen de la mezcla}} = \rho_A + \rho_B = \rho_m \quad (\text{III.11})$$

Entonces:

$$v_h = \frac{N_A + N_B}{\rho_A + \rho_B} = \frac{\rho_A v_A + \rho_B v_B}{\rho_m} \quad (\text{III.12})$$

y también, usando las ecuaciones III.5 y III.6:

$$v_h = C_A v_A + C_B v_B \quad (\text{III.13})$$

Al tratar con procesos de difusión, es importante la transferencia de masa con respecto a la velocidad hidrodinámica o convectiva del fluido. El flujo de masa por unidad de área, del componente A (con respecto a la velocidad hidrodinámica):

$$J_A = \rho_A (v_A - v_h) \quad (\text{III.14})$$

Este flujo es proporcional al gradiente de concentración local. Entonces la primera ley de Fick puede enunciarse en forma vectorial, como:

$$J_A = -\rho_m D_{AB} \nabla C_A \quad (\text{III.15})$$

### III.1.2 DISPERSION EN FLUJO TURBULENTO

Si un fluido está fluyendo a través de un medio poroso existe un factor adicional causado por el movimiento de fluidos o por un gradiente de concentración como resultado del flujo de fluidos y se le denomina dispersión.

#### a) DISPERSION LONGITUDINAL

El fenómeno de dispersión se muestra esquemáticamente en la figura III.1. En el tiempo  $t=0$ , se introduce instantánea y uniformemente una cantidad finita de trazador a través del conducto; si el trazador se mueve corriente abajo con una velocidad uniforme  $U$ , se dispersará longitudinalmente debido a la mezcla turbulenta, como se muestra en la figura III.1(a). En el flujo mostrado en la figura III.1(b), las capas adyacentes de fluido están moviéndose con diferentes velocidades longitudinales, mientras ocurre una mezcla lateral por efecto de la turbulencia. Esto da como resultado una dispersión longitudinal mucho mayor.

La dispersión longitudinal ocurre en dirección del movimiento global de los fluidos, para estudiarla se han utilizado diferentes modelos para representar los medios porosos, por ejemplo conjuntos de tubos capilares de sección transversal variable orientados al azar, empacamientos de material granular entre otros. Los datos reportados en la literatura muestran que el coeficiente de dispersión longitudinal para arenas no consolidadas o empacamientos, pueden determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{E}{D_0} = 1.75 \frac{V dp}{D_0} \quad (\text{III.16})$$

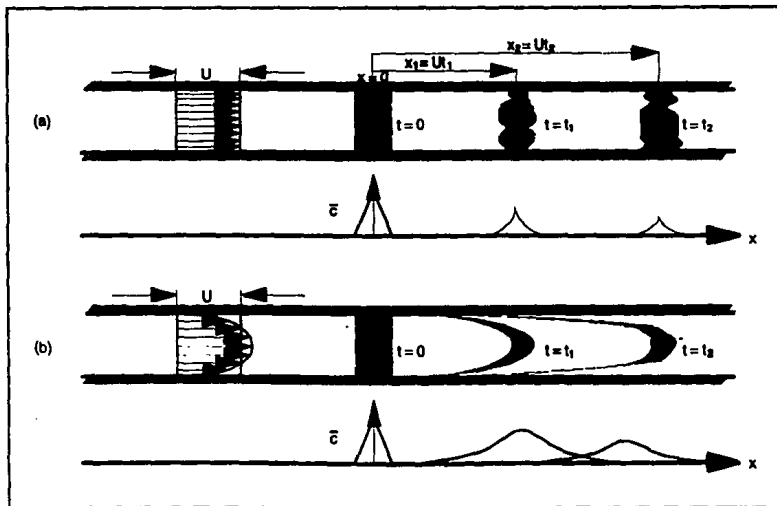


FIGURA III.1 MECANISMO DE LA DISPERSION LONGITUDINAL: (a) DIFUSION TURBULENTO EN UN FLUJO DE VELOCIDAD UNIFORME; (b) DISPERSION TURBULENTO DEBIDA A LA DISTRIBUCION NO UNIFORME DE LA VELOCIDAD<sup>10</sup>.

En la zona donde los procesos de difusión y dispersión son relevantes, el coeficiente total de dispersión es la suma del coeficiente de difusión:

$$\frac{D}{D_o} = \frac{1}{F\phi} \quad (\text{III.17})$$

y del coeficiente de dispersión, ecuación III.16.

El coeficiente de dispersión longitudinal total en un empacamiento de arena no consolidada se determina con la siguiente ecuación:

$$K_l = D + E$$

$$\frac{K_l}{D_o} = \frac{D}{D_o} + \frac{E}{D_o}$$

$$\frac{K_l}{D_o} = \frac{1}{F\phi} + 1.75 \frac{V_{dp}}{D_o} \quad (\text{III.18})$$

La ecuación anterior es válida para valores de  $V_{dp}/D_o < 50$ .

#### b) DISPERSION TRANSVERSAL

Este fenómeno tiene transferencia de masa entre las corrientes. El coeficiente de dispersión transversal puede ser determinado graficando la composición contra la distancia, medida a partir del punto correspondiente a una concentración de 50%, tal como se muestra en la figura III.2.

El coeficiente de dispersión transversal puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$K_t = \frac{V}{L_T} \left[ \frac{X_{90} - X_{10}}{3.625} \right]^2 \quad (\text{III.19})$$

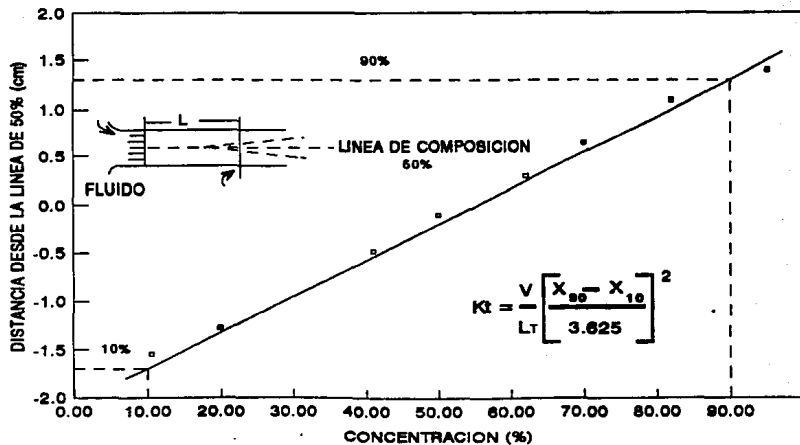


FIGURA III.2 PERFIL DE CONCENTRACION TRANSVERSAL  
(EN PAPEL ARITMETICO PROBABILISTICO)<sup>(1)</sup>.

El coeficiente de dispersión transversal total es la suma de los coeficientes de difusión y de dispersión transversal convectivo. La expresión final para condiciones de flujo laminar, en empacamientos no consolidados con distribución no uniforme de tamaño del grano es:

$$\frac{K_r}{D_o} = \frac{1}{P\phi} + \frac{V}{Lr} \left[ \frac{X_{90} - X_{10}}{3.625} \right]^2 \quad (\text{III.20})$$

Existen además algunos otros factores que influyen en los procesos de difusión y dispersión en medios porosos, pudiendo mencionarse los siguientes: relación del diámetro de la partícula al diámetro de la columna, distribución del diámetro de la partícula, forma de la partícula, permeabilidades heterogéneas, fluidos con viscosidad y densidad diferentes, flujo turbulento, efectos de la fase inmóvil, etc.

La contraparte turbulenta de la ecuación de difusión convectiva (dispersión), se obtiene haciendo uso de la analogía entre las difusiones turbulenta y molecular. Si se representan las componentes de la velocidad hidrodinámica instantánea en términos de la suma de una velocidad media y una fluctuante:

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad w = \bar{w} + w' \quad (\text{III.21})$$

Además, la concentración del trazador que se difunde puede representarse en forma semejante, como:

$$C_A = \bar{C}_A + C'_A \quad (\text{III.22})$$

Suponiendo que  $D_{AB}$  es constante, se sustituyen las velocidades media y fluctuante, así como las concentraciones en la ecuación de difusión convectiva (dispersión):

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} + w \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB} \left[ \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] + \frac{n_A}{\rho_m} \quad (\text{III.23})$$

Entonces, de cada término se toma el valor medio respecto al tiempo. Suponiendo que la densidad de la masa total,  $\rho_m$ , es constante y haciendo uso de la condición de continuidad, que debe cumplirse tanto para el movimiento turbulento como para el laminar. Para fluidos incompresibles, la divergencia de la velocidad es igual a cero,

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.24})$$

y se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial z} = & - \frac{\partial(\overline{u'C'_A})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{v'C'_A})}{\partial y} \\ & - \frac{\partial(\overline{w'C'_A})}{\partial z} + D_{AB} \left[ \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial z^2} \right] + \frac{\rho_A}{\rho_m} \end{aligned} \quad (\text{III.25})$$

El valor medio, respecto al tiempo, de los términos cruzados  $u'C'_A$ ,  $v'C'_A$  y  $w'C'_A$ , representan los flujos de volumen por unidad de área del componente A debidos a la turbulencia del fluido. El flujo de masa del trazador por unidad de área, está dado entonces por el producto de estos términos y la densidad media,

$$\text{flujo turbulento de masa por unidad de área} = \rho_m \overline{\partial(u'C'_A)}$$

Por analogía con la primera ley de Fick (ecuación III.15), se supone que el flujo turbulento es proporcional al gradiente de la concentración media y al coeficiente de difusión turbulenta:

$$\rho_m \overline{\partial(u'C'_A)} = - \rho_m \epsilon_x \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial x},$$

$$\rho_m \overline{\partial(v'C'_A)} = - \rho_m \epsilon_y \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial y},$$

$$\rho_m \delta(\overline{w' C_A'}) = - \rho_m \epsilon_z \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial z} \quad (\text{III.26})$$

Solamente para el caso de turbulencia isotrópica, los coeficientes de difusión turbulenta son los mismos en las tres direcciones coordenadas. Sustituyendo la ecuación III.26 en la III.25 se tiene la ecuación de difusión de un flujo turbulento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \epsilon_x \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \epsilon_y \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial y} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \epsilon_z \frac{\partial \bar{C}_A}{\partial z} \right] + D_{AB} \left[ \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}_A}{\partial z^2} \right] + \frac{r_A}{\rho_m} \quad (\text{III.27}) \end{aligned}$$

En el movimiento turbulento, los coeficientes de difusión turbulenta son de órdenes de magnitud mucho mayores que los coeficientes de difusión molecular. Por tanto, a menos que se esté tratando con difusión cerca de una frontera sólida, se permite generalmente despreciar por completo la difusión molecular.

## III.2 ECUACION GENERAL DE DISPERSION

### III.2.1 ECUACION DE DISPERSION EN FLUIDOS NO-HOMOGENEOS

La derivación de la ecuación se basa en la ley de conservación de masa, y para simplificar y facilitar el desarrollo se hará en términos de coordenadas cartesianas (x, y, z).

La descripción del mecanismo de transporte de masa a través de un medio poroso se hará a través de un modelo, tal que las condiciones promedio puedan ser fácilmente expresadas. La primera suposición general considera que ocurre flujo tipo pistón en la ley de Darcy.



En otras palabras, se asume que todas las partículas de agua se mueven a la misma velocidad a través del medio poroso, despreciándose la variación microscópica de la velocidad del fluido. Para el mecanismo de dispersión, este comportamiento envuelve un componente de transporte, que se basa en el estudio del flujo laminar a través de tuberías.

El coeficiente que aparece en los componentes de dispersión se asume que es aproximadamente una constante, que generalmente depende del grado de concentración y del tipo de disolvente suspendido en la sustancia.

El desarrollo de la ecuación diferencial de cualquier forma, está basada en las siguientes suposiciones:

- La conservación de la masa.
- La concentración es suficientemente pequeña.
- El coeficiente de dispersión es independiente de la concentración.
- No existe reacción química entre las fases sólida y líquida.
- No existe pérdida de fluido.

La expresión para la conservación de la masa de un componente en un sistema binario, se obtiene sumando los flujos de las masas en el volumen de control diferencial, y una expresión conveniente para el flujo de masa con respecto a un sistema fijo de coordenadas se encuentra combinando las ecuaciones III.8 y III.14:

$$N_A = J_A + \rho_A v_h \quad (\text{III.28})$$

Usando la primera ley de Fick (ecuación III.28) e introduciendo la concentración por medio de las ecuaciones III.5 y III.15, el flujo de masa se transforma en:

$$N_A = -\rho_A D_{AB} \nabla C_A + \rho_A C_A v_h \quad (\text{III.29})$$

Esta última expresión tiene la ventaja sobre la ecuación III.8 de que  $N_A$  está en términos de cantidades fácilmente medibles: la densidad local  $\rho_A$ , la concentración  $C_A$  y la velocidad hidrodinámica  $v_h$ .

Ahora, la expresión para la conservación de la masa para el componente A en coordenadas cartesianas (figura III.3).

$$I = \frac{\text{Masa}}{\text{seg}} \text{ del componente A: } (N_A) \Delta x \Delta y \Delta z$$

$$II = \left[ (N_A)_x + \frac{\partial (N_A)_x}{\partial x} \Delta x \right] \Delta y \Delta z$$

Flujo neto de masa A a través del elemento de fluido (flujo de entrada menos flujo de salida).	+	rapidez de producción de la masa del elemento A dentro del elemento de fluido.	=	rapidez de acumulación de masa del elemento A dentro del elemento de fluido.
---	---	---	---	--

En forma matemática, se tiene:

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\partial (N_A)_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial (N_A)_y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial (N_A)_z}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \\
 & + m_A \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{III.30})
 \end{aligned}$$

Dividiendo entre el elemento de volumen  $\Delta x \Delta y \Delta z$ , y agrupando términos:

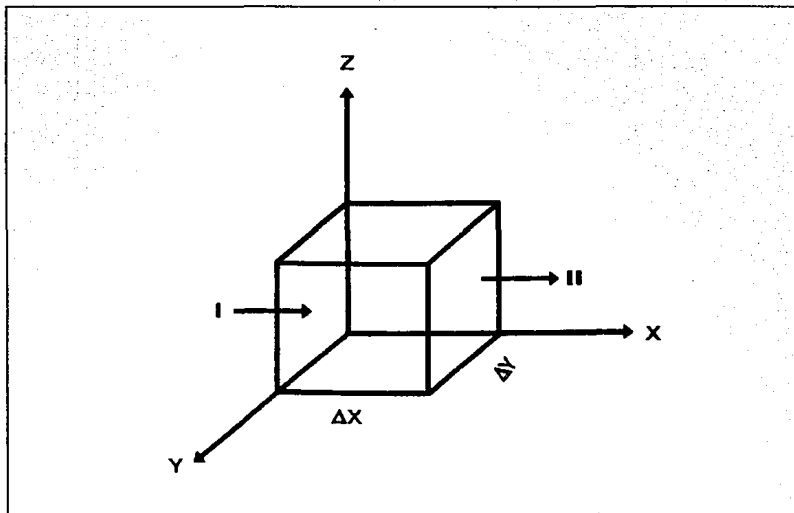


FIGURA III.3 FLUJO DE MASA DEL COMPONENTE A EN LA DIRECCION  $X^{(a)}$ .

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \frac{\partial(N_A)x}{\partial x} + \frac{\partial(N_A)y}{\partial y} + \frac{\partial(N_A)z}{\partial z} = m_A \quad (\text{III.31})$$

o en forma vectorial,

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \nabla N_A = m_A \quad (\text{III.32})$$

En forma similar, la conservación de la masa de la substancia B puede escribirse como:

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \nabla N_B = m_B \quad (\text{III.33})$$

En un sistema binario, la producción de A (trazador) puede sólo ocurrir a expensas de B (agua), ya que la masa total del sistema debe conservarse. Entonces:

$$m_A = - m_B \quad (\text{III.34})$$

Por lo que, sumando las ecuaciones III.32 y III.33 se obtiene:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \nabla N_A + \nabla N_B = 0 \quad (\text{III.35})$$

o bien, usando las ecuaciones III.11 y III.12, se tiene:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m v_h) = 0 \quad (\text{III.36})$$

que es la ecuación general de continuidad para la mezcla de fluidos.

Volviendo a la ecuación de conservación de la masa, para un solo componente (ecuación III.32), reemplazando al vector de flujo  $N_A$ , por su forma equivalente de la ecuación III.29, y puesto que  $\rho_A$  es igual a  $\rho_m C_A$ , se obtiene:

$$\frac{\partial(\rho_m C_A)}{\partial t} + \nabla \cdot (-\rho_m D_{AB} \nabla C_A + \rho_m C_A v_h) = m_A \quad (\text{III.37})$$

desarrollando y agrupando términos, se tiene:

$$\frac{\partial(\rho_m C_A)}{\partial t} + \rho_m C_A \nabla v_h + v_h \nabla \rho_m C_A = \rho_m D_{AB} \nabla^2 C_A + (\nabla C_A) \cdot (\nabla \rho_m D_{AB}) + m_A \quad (\text{III.38})$$

Si el fluido es incompresible,  $\nabla v_h = 0$ . Además, si la solución es diluida, tanto la densidad total de la mezcla ( $\rho_m$ ) como el coeficiente de difusión son esencialmente constantes. Por tanto, después de dividir entre  $\rho_m$  la ecuación III.38 se transforma en:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + v_h \nabla C_A = D_{AB} \nabla^2 C_A + \frac{m_A}{\rho_m} \quad (\text{III.39})$$

y en forma cartesiana:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} + w \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB} \left[ \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] + \frac{m_A}{\rho_m} \quad (\text{III.40})$$

Despejando el término  $\partial C_A / \partial t$ , se tiene:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \left[ \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] + \frac{m_A}{\rho_m} - u \frac{\partial C_A}{\partial x} - v \frac{\partial C_A}{\partial y} - w \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (\text{III.41})$$

Esta es conocida como la ecuación general de dispersión (ecuación de difusión-convección), y es la expresión para la conservación de masa de la sustancia A, la cual sufre una dispersión ordinaria en un flujo laminar incompresible.

Si la velocidad convectiva y la producción del trazador son cero, la ecuación (III.41) se reduce a:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C_A \quad (\text{III.42})$$

Esta ecuación es denominada como la segunda ley de Fick. Si la concentración se reemplaza por la temperatura T, y  $D_{AB}$  por la difusividad térmica  $\alpha$ , se tiene la ecuación de calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (\text{III.43})$$

que es una de las ecuaciones básicas de la transferencia del calor.

### III.2.2 SOLUCIONES ANALÍTICAS DE LA ECUACION DE DISPERSION

#### a) SOLUCION DE A. OGATA <sup>(10)</sup>

Considerando que el coeficiente de la masa del componente A sobre la densidad de la mezcla es constante, ya que no cambia en dirección ni en tiempo, entonces la ecuación III.41 queda:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \left[ \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] - u \frac{\partial C_A}{\partial x} - v \frac{\partial C_A}{\partial y} - w \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (\text{III.44})$$

Desarrollando la ecuación anterior:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} D_{AB} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} D_{AB} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} D_{AB} - u \frac{\partial C_A}{\partial x} - v \frac{\partial C_A}{\partial y} - w \frac{\partial C_A}{\partial z}$$

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x} + D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial y} + D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} \right] - u \frac{\partial C_A}{\partial x}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x} + D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial y} + D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} \right] - v \frac{\partial C_A}{\partial y}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x} + D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial y} + D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} \right] - w \frac{\partial C_A}{\partial z}$$

(III.45)

Esta ecuación puede ser representada en notación tensorial quedando de la siguiente forma:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x_j} \right] - v_i \frac{\partial C_A}{\partial x_i}$$

(III.46)

A. Ogata presentó una solución analítica de la ecuación de dispersión en medios porosos para el caso de una dimensión. El consideró una columna semi-infinita de arena, la cual inicialmente está saturada de agua pura.

Al tiempo  $t=0$  se considera que el fluido contiene una concentración  $C_{A0}$  de sustancia transportable (trazador). El problema consiste en la caracterización de la concentración  $C_A$ , como una función de la distancia longitudinal  $x$  y el tiempo  $t$ .

La ecuación que gobierna el fenómeno en una dimensión puede ser obtenida de la ecuación III.45; la cual queda para el flujo en una sola dirección longitudinal:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{III.47})$$

Las condiciones de frontera para este problema son las siguientes:

$$\begin{aligned} C(0,t) &= C_0 ; t \geq 0 \\ C(x,0) &= 0 ; x \geq 0 \\ C(\infty,t) &= 0 ; t \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{III.48})$$

El problema se puede resolver haciendo un cambio de variable, en el cual:

$$C(x,t) = G(x,t) \exp \left[ \frac{vx}{2D} - \frac{v^2 t}{4D} \right] \quad (\text{III.49})$$

Sustituyendo III.49 en III.47 se tiene:

$$\frac{\partial G(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 G(x,t)}{\partial x^2} \quad (\text{III.50})$$

La cual tiene la forma de la ecuación de calor.

Considerando la ecuación III.49 y transformando las condiciones de frontera, quedan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} G(0,t) &= C_0 \exp(v^2 t / 4D) ; t \geq 0 \\ G(x,0) &= 0 \quad \quad \quad x \geq 0 \\ G(\infty,t) &= 0 \quad \quad \quad t \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{III.51})$$

Con estas condiciones de frontera, se obtiene la solución de la ecuación III.50.



Una forma más sencilla de obtener la solución de la ecuación III.50 con las condiciones de frontera III.51 se presenta a continuación, utilizando la transformada de Laplace:

$$\ell \left\{ \frac{\partial G(x,t)}{\partial t} \right\} = sG(x,s) - G(x,0)$$

$$\ell \left\{ \frac{\partial^2 G(x,t)}{\partial x^2} \right\} = \frac{d^2 G(x,s)}{dx^2} \quad (\text{III.52})$$

Ahora, transformando las condiciones de frontera III.51 se tiene:

$$G(0,s) = \frac{C_0}{s - v^2/4D} \quad ; \quad s > v^2/4D$$

$$G(x,0) = 0 \quad x \geq 0$$

$$G(\infty,s) = 0 \quad s \geq 0 \quad (\text{III.53})$$

Sustituyendo III.52 en III.50 se tiene:

$$sG(x,s) - G(x,0) = D \frac{d^2 G(x,s)}{dx^2} \quad (\text{III.54})$$

Utilizando la segunda condición de frontera de III.53 en III.54 se tiene:

$$D \frac{d^2 G(x,s)}{dx^2} - sG(x,s) = 0 \quad (\text{III.55})$$

la cual tiene como solución:

$$G(x,s) = A \exp((s/D)^{0.5}x) + B \exp(-(s/D)^{0.5}x) \quad (\text{III.56})$$

Donde A y B son dos constantes arbitrarias.

Utilizando la tercera condición de frontera de III.53 en III.56 se llega a:

$$0 = A \exp((s/D)^{0.5}x) \quad (III.57)$$

Como  $\exp((s/D)^{0.5}x)$  no puede ser cero en III.57, para que esta relación se cumpla necesariamente  $A=0$ , por lo que la ecuación III.56 queda:

$$G(x,s) = B \exp(-(s/D)^{0.5}x) \quad (III.58)$$

Considerando la primera condición de frontera III.53 en la ecuación III.58 se llega a:

$$B = \frac{C_0}{s - V^2/4D}$$

Por lo que la solución de III.50 es:

$$G(x,s) = \frac{C_0 \exp(-(s/D)^{0.5}x)}{s - V^2/4D} \quad (III.59)$$

La antitransformada de III.59 es:

$$\begin{aligned} \frac{G(x,t)}{C_0} = & \frac{1}{2} \exp\left(\frac{V^2t}{4D}\right) \left\{ \exp\left[-x\left(\frac{V^2}{4D^2}\right)^{0.5}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2(Dt)^{0.5}} - \left(\frac{V^2t}{4D}\right)^{0.5}\right] \right. \\ & \left. + \exp\left[x\left(\frac{V^2}{4D^2}\right)^{0.5}\right] \operatorname{erfc}\left[-\frac{x}{2(Dt)^{0.5}} + \left(\frac{V^2t}{4D}\right)^{0.5}\right] \right\} \quad (III.60) \end{aligned}$$

Esta es la solución de la ecuación III.50 en el dominio del tiempo.

Para encontrar la solución de la ecuación III.47 solamente se regresa a la variable original  $C(x,t)$ , por lo que sustituyendo en la ecuación III.60 la ecuación III.49 se tiene:

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x - Vt}{2(Dt)^{0.5}} \right) + \exp \left( \frac{Vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x + Vt}{2(Dt)^{0.5}} \right) \right] \quad (\text{III.61})$$

Donde  $\operatorname{erfc}$  es la función error complementaria y se define como:

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\pi^{0.5}} \int_0^z e^{-p^2} dp \quad (\text{III.62})$$

La ecuación III.61 es la solución del fenómeno de dispersión para el caso unidimensional con inyección constante de trazador. Las figuras III.4 y III.5 muestran el comportamiento de esta solución. En la figura III.4 se puede observar como se comportaría el trazador para un caso ideal en el cual se muestrearía el trazador a una distancia fija, y a diversos tiempos.

La figura III.5 muestra el comportamiento que seguiría este mismo trazador cuando fuera muestreado a diferentes distancias, pero referidas a un mismo tiempo.

Los datos empleados en la obtención de estas gráficas se encuentran en el extremo superior de las mismas<sup>(10)</sup>.

#### b) SOLUCION DE HOLLY-GUINASSO-ESSINGTON<sup>(11)</sup>

Este es un modelo matemático para el problema unidimensional del transporte de material radioactivo en medios porosos, que incorpora el fenómeno de adsorción y resuelve el problema mediante la reducción de la ecuación de transporte, a una ecuación de calor, haciendo algunos cambios de variable.

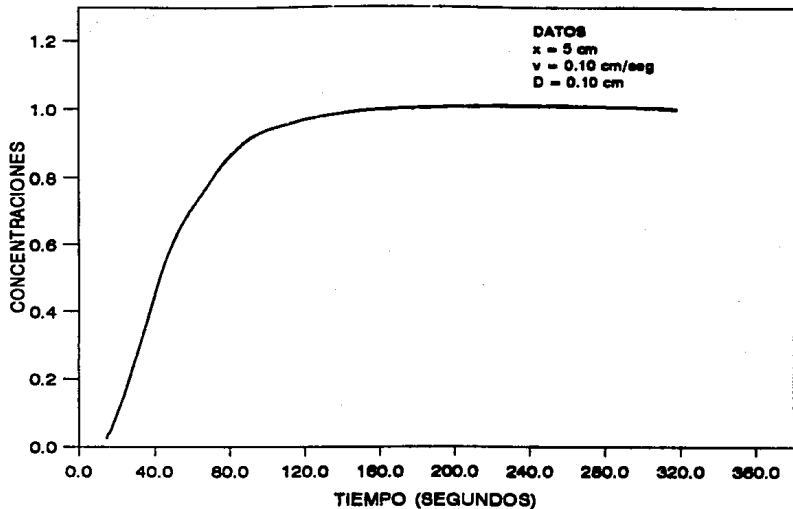


FIGURA III.4 COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACION DE UN TRAZADOR DETECTADO A UNA MISMA DISTANCIA<sup>(10)</sup>

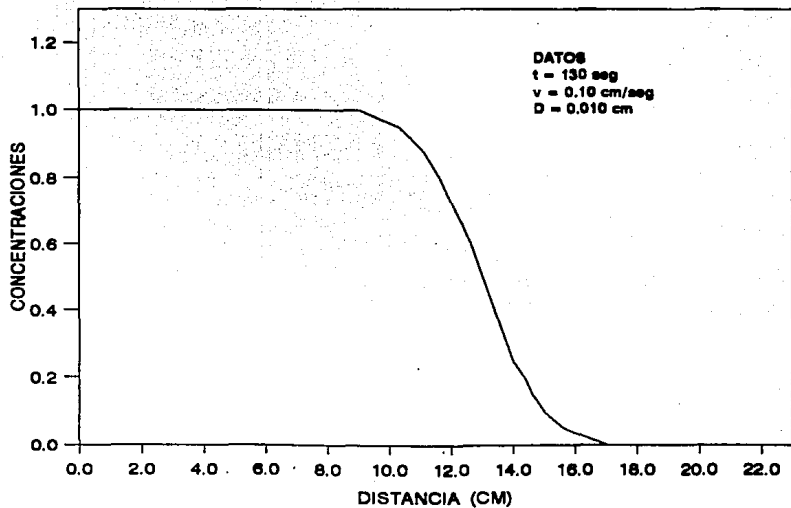


FIGURA III.5 COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACION DE UN TRAZADOR DETECTADO A DIFERENTES DISTANCIAS<sup>(19)</sup>.

El fenómeno de adsorción es la penetración superficial del líquido en un sólido.

La ecuación es la siguiente:

$$B \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -BAC(x,t) + D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - V \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \quad (\text{III.63})$$

donde:

$$B = 1 + ((1-\phi)/\phi)K \quad \text{y} \quad K = q/C.$$

Para el planteamiento de la ecuación III.63 se consideró que existe una relación lineal entre la concentración del material radioactivo en la fase líquida y la concentración en la fase sólida.

Haciendo un cambio de variable en la ecuación III.49 se tiene:

$$C(x,t) = F(x,t) \exp(-\lambda t) \quad (\text{III.64})$$

Sustituyendo en la ecuación III.63 se tiene:

$$B \frac{\partial F(x,t)}{\partial t} - D \frac{\partial^2 F(x,t)}{\partial x^2} + V \frac{\partial F(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.65})$$

Ahora, cambiando la escala del tiempo, de tal forma que  $t=Br$ , se obtiene:

$$\frac{\partial F(x,\tau)}{\partial \tau} - D \frac{\partial^2 F(x,\tau)}{\partial x^2} + V \frac{\partial F(x,\tau)}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.66})$$

Finalmente se hace un nuevo cambio de variable, quedando:

$$F(x, \tau) = \exp \frac{Vx}{2D} - \frac{V^2 \tau}{4D} G(x, \tau) \quad (\text{III.67})$$

Sustituyendo en la ecuación III.66 se tiene:

$$\frac{\partial G(x, \tau)}{\partial \tau} - D \frac{\partial^2 G(x, \tau)}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{III.68})$$

La ecuación III.68 tiene la forma de la ecuación de calor y su solución depende de las condiciones de frontera.

Holly-Guinasso-Essington obtienen tres diferentes soluciones de la ecuación III.68 de acuerdo a tres diferentes problemas de inyección de trazador radioactivo.

En la solución de estos problemas las condiciones de frontera sufren los mismos cambios de variable efectuados a la ecuación III.63.

Los diferentes problemas de inyección, junto con sus respectivas condiciones de frontera, así como las soluciones de cada problema se presenta a continuación.

- Definición de las condiciones de frontera.

Tres condiciones de frontera deben de ser especificadas para poder resolver la ecuación III.68; en este caso, para los tres diferentes problemas de dispersión, dos condiciones de frontera son mantenidas para todas las soluciones.

La primera condición de frontera es aquella en la que se asegura que la concentración, a medida que crece la distancia tiende a ser nula.

La segunda condición de frontera es la que especifica que la concentración a un tiempo cero y a cualquier distancia mayor que cero es nula.

Estas dos ecuaciones se pueden expresar algebraicamente como:

$$\begin{aligned} C(x,t) &= 0 ; t \geq 0 \\ C(x,0) &= 0 ; x \geq 0 \end{aligned} \quad \text{(III.69)}$$

La tercera condición de frontera es la que expresa el valor de la concentración en el origen y a cualquier tiempo  $C(0,t)$ , esta condición es una función del tipo de inyección inicial en la fuente, y es tratada independientemente para los tres diferentes tipos de inyección que se muestran aquí.

### 1<sup>er</sup> Caso Inyección Constante

Considerando que el trazador radioactivo es introducido al sistema con un gasto constante, la condición de frontera será:

$$C(0,t) = C_0 ; t \geq 0 \quad \text{(III.70)}$$

La solución de la ecuación III.65, utilizando las condiciones de frontera de las ecuaciones III.69 y III.70 y utilizando la transformada de Laplace en la ecuación III.68, es la siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{C(x,t)}{C_0} = & \frac{1}{2} \left\{ \exp \left[ \frac{Vx}{2D} (1-H) \right] \operatorname{erfc} \left( x - \frac{VtH}{2(Dt/B)^{0.5}} \right) \right. \\ & \left. + \exp \left[ \frac{Vx}{2D} (1+H) \right] \operatorname{erfc} \left( x + \frac{VtH}{2(Dt/B)^{0.5}} \right) \right\} \end{aligned} \quad \text{(III.71)}$$

en donde

$$H = (1 + (4\lambda BD)/v^2)^{0.5}$$

Es importante hacer notar que en la ecuación III.71 se hace  $\lambda=0$ ,  $B=1$  y se está considerando trazador químico.



La figura III.6 muestra una gráfica para la ecuación III.71, la cual representa el caso de inyección constante de trazador radioactivo (tritio).

## 2<sup>da</sup> Caso Inyección de un Bache con Mezclado

Si el trazador radioactivo es inyectado en un medio poroso de manera lenta y en un período de tiempo considerablemente grande (años por ejemplo), si además el trazador es capaz de mezclarse con el fluido contenido por el medio poroso, el trazador mezclado con el fluido se moverá a través del sistema (el cual originalmente tenía una concentración cero), y la concentración en el punto de inyección variará con el tiempo.

Esta dependencia del tiempo puede ser definida del balance de materia alrededor de la fuente, el cual da como resultado lo siguiente:

$$C(0,t) = C_0 \exp\left[-\frac{V\epsilon/(Lr + \lambda B)}{B} t\right] \quad (\text{III.72})$$

La solución de la ecuación III.65 utilizando las condiciones de frontera, III.69 y III.72, es:

$$\begin{aligned} \frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \exp(-\lambda t) \exp(-Vt\epsilon/BLr) & \left[ \exp\left(\frac{Vx}{2D}(1-M)\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x - VtM/B}{2(Dt/B)^{0.5}}\right) \right. \\ & \left. + \exp\left(\frac{Vx}{2D}(1+M)\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x + VtM/B}{2(Dt/B)^{0.5}}\right) \right] \quad (\text{III.73}) \end{aligned}$$

En donde:

$$M = (1 + (4D\epsilon)/(Lr V))^{0.5}$$

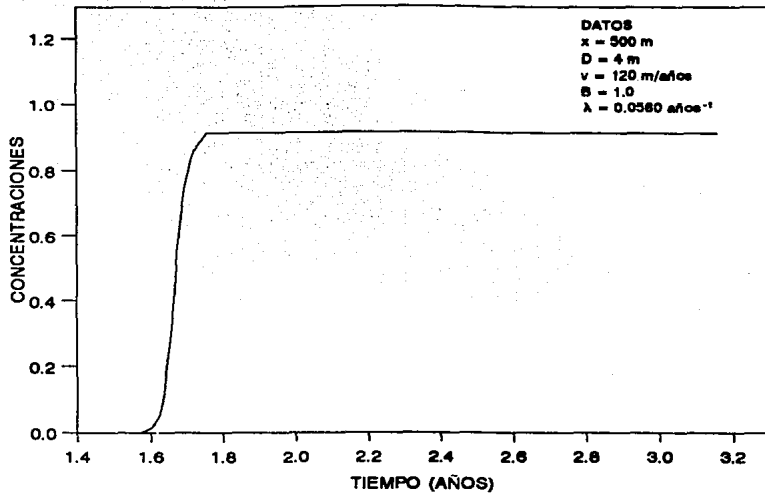


FIGURA III.6 REPRESENTACION GRAFICA DE LA ECUACION III.71, PARA INYECCION CONSTANTE DE TRAZADOR RADIOACTIVO (TRITIO)<sup>(11)</sup>.

La figura III.7 muestra la gráfica de la solución de la ecuación III.73, para un trazador radioactivo.

### 3<sup>er</sup> Caso Inyección de Bache sin Mezclado

Si dentro del medio poroso no ocurre mezcla del trazador con el fluido, y si no hay adsorción en la fase sólida, la concentración en la fuente estará dada por un pulso de entrada, el cual será:

$$C(0,t) = C_0 \exp(-\lambda t) \quad ; \quad 0 \leq t \leq t_0 \quad \text{(III.74)}$$

$$C(0,t) = 0 \quad t > t_0 \quad \text{(III.75)}$$

En donde:

$$t_0 = Lx/V$$

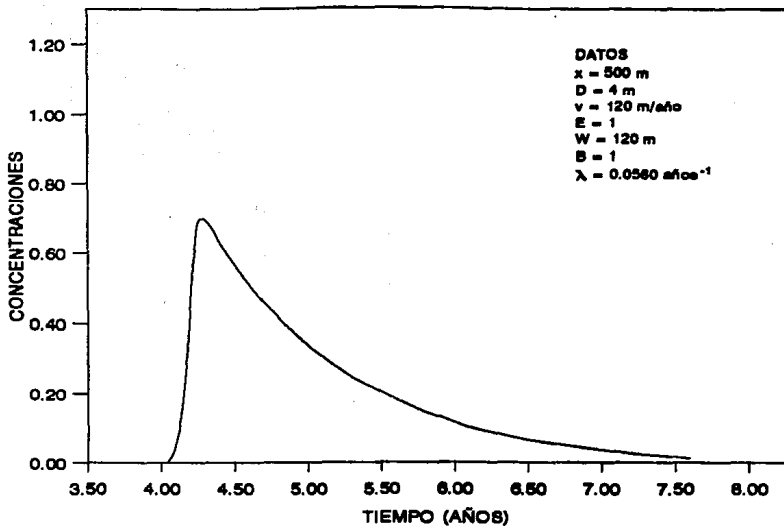
La solución de la ecuación III.65 y utilizando las condiciones de frontera III.69, III.74 y III.75 es:

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \exp(-\lambda t) \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x - Vt/B}{2(Dt/B)^{0.5}} \right) + \exp(Vx/D) \operatorname{erfc} \left( \frac{x + Vt/B}{2(Dt/B)^{0.5}} \right) \right] \quad \text{(III.76)}$$

Para  $t \leq t_0$ , y

$$\begin{aligned} \frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \exp(-\lambda t) & \left\{ \operatorname{erfc} \left( \frac{x - Vt/B}{2(Dt/B)^{0.5}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{x - V(t-t_0)/B}{2(D(t-t_0)/B)^{0.5}} \right) \right. \\ & \left. + \exp(Vx/D) \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x + Vt/B}{2(Dt/B)^{0.5}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{x + V(t-t_0)/B}{2(D(t-t_0)/B)^{0.5}} \right) \right] \right\} \quad \text{(III.77)} \end{aligned}$$

Para  $t > t_0$ .

FIGURA III.7 SOLUCION DE LA ECUACION III.79 PARA UN TRAZADOR RADIOACTIVO<sup>(11)</sup>.

La figura III.8 muestra el comportamiento de las soluciones de las ecuaciones III.76 y III.77, que fue obtenida para un trazador radioactivo.

### III.3 MODELOS REPRESENTATIVOS DE MEDIOS POROSOS HOMOGENEOS

#### a) MODELO DE DIFUSION DE GERSHON<sup>(12)</sup>

Gershon incluye dos efectos adicionales en el modelo de difusión, considera que la adsorción del trazador en los granos de la roca y el decaimiento del mismo (tratándose de un trazador radioactivo) pueden llegar a ser de importancia.

Gershon supone que la adsorción del trazador en la roca ocurre mediante una reacción de primer orden, en la que se debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$n = K C \quad (\text{III.78})$$

El cambio de la concentración en la fase líquida debida a la adsorción será:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{1}{\phi} \frac{\partial n}{\partial t} = - \frac{K}{\phi} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{III.79})$$

La declinación del trazador, ocasionada por la pérdida de radioactividad, es:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\lambda C \quad (\text{III.80})$$

Si se considera un trazador radioactivo y adsorbible a la roca, el cambio de concentración del trazador será:

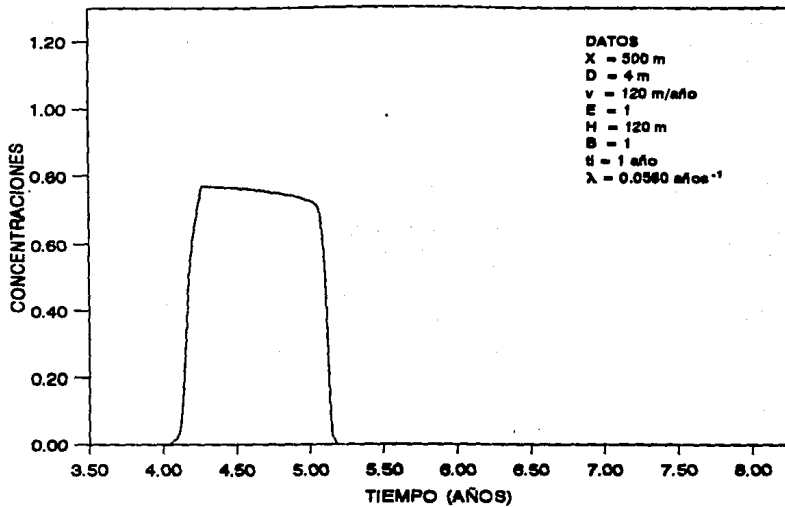


FIGURA III.8 SOLUCION DE LAS ECUACIONES III.76 Y III.77  
PARA UN TRAZADOR RADIOACTIVO<sup>(11)</sup>.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\lambda C - \frac{\lambda K}{\phi} C = -\lambda C(1 + K/\phi) \quad (\text{III.81})$$

Sustituyendo las ecuaciones III.79 y III.80 en la ecuación III.47 se tendrá la ecuación de difusión incluyendo los procesos de adsorción y decaimiento radioactivo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{\delta} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{V}{\delta} \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C \quad (\text{III.82})$$

donde:

$$\delta = (1 + D/\phi)$$

Se pueden presentar los siguientes casos particulares de la ecuación anterior:

a) Flujo en régimen permanente:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda \delta C = 0 \quad (\text{III.83})$$

b) Trazador químico o radioactivo cuyo tiempo de decaimiento es grande comparado con el tiempo de tránsito en el medio poroso ( $\lambda=0$ ):

$$\frac{D}{\delta} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{V}{\delta} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{III.84})$$

b) MODELO DE DIFUSION DE BRIGHAM<sup>(13)</sup>

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 a la salida de los núcleos en las mediciones efectuadas en el laboratorio.

Los modelos predicen la concentración "in-situ" y la concentración que es medida a la salida de los núcleos es la correspondiente a la concentración fluyente. Para demostrar lo anterior Brigham emplea el modelo de difusión para un sistema semifinito, utilizando las siguientes condiciones iniciales y de frontera:

$$C(x,0) = 0 \quad ; \quad x \geq 0 \quad \text{(III.85)}$$

$$C(0,t) = C_0/2 \quad ; \quad t > 0 \quad \text{(III.86)}$$

$$C(\infty,t) = 0 \quad ; \quad t > 0 \quad \text{(III.87)}$$

La solución de la ecuación III.47 con estas condiciones es:

$$C = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x - vt}{2(Dt)^{0.5}} \right) \quad \text{(III.88)}$$

Para comparar la ecuación anterior con los datos experimentales, es necesario evaluarla en  $x=L$  y expresarla en función de los volúmenes porosos de fluidos inyectados, por lo que la ecuación a compararse es la siguiente:

$$C = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{1 - I}{2 I/\delta_h} \right) \quad \text{(III.89)}$$

La figura III.9 muestra los resultados obtenidos aplicando la ecuación III.89 para diferentes valores de volúmenes de poros inyectados ( $I$ ) y un valor de factor de heterogeneidad ( $\delta_h = 14$ ). El balance de materia puede verificarse fácilmente trazando una línea vertical en  $I=1$ , las áreas correspondientes a cada uno de los lados de esta línea deben ser iguales para que el balance de materia se cumpla.



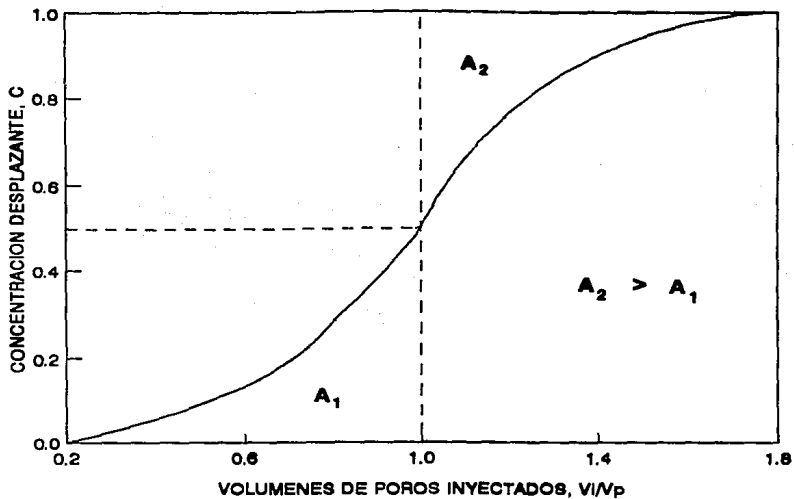


FIGURA III.9 CONCENTRACION DEL FLUIDO DESPLAZANTE EN EL AFLUENTE UTILIZANDO LA ECUACION III.89<sup>(13)</sup>.

Observando con detalle esta figura se puede notar que el área 1 es diferente al área 2 ( $A_2 > A_1$ ). Notamos también de la figura, que para  $I=1$ , se tiene justamente un valor de 0.5 de concentración. Lo anterior verifica que el balance de materia no se cumple.

Brigham demostró que el error consistía en una inadecuada interpretación de las condiciones de frontera, esto puede fácilmente verificarse en la siguiente forma: el gasto fluyente del fluido desplazante en cualquier plano arbitrario de la sección transversal, es por definición:

$$q = vA\phi C - DA\phi(\partial C/\partial x) \quad (\text{III.90})$$

Dividiendo la ecuación anterior entre el gasto total  $vA\phi$  y tomando en cuenta que la concentración del fluido desplazante será igual a su gasto dividido entre el gasto total:

$$C' = q/vA\phi = C - ((D/v)(\partial C/\partial x)) \quad (\text{III.91})$$

Debido a que esta diferencia es siempre negativa, la concentración fluyente,  $C'$ , será siempre mayor que la concentración "in-situ",  $C$ , lo cual equivale a decir que, debido al gradiente de concentración existente, el fluido desplazante fluye más rápido que el fluido desplazado.

Lo anterior es análogo a la teoría de Buckley-Leverett para desplazamiento inmisible, en donde la fracción fluyente de agua,  $f_w$ , es mayor que la fracción del agua "in-situ",  $S_w$ .

Para evaluar la ecuación III.91 se requiere diferenciar la ecuación III.88:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = - \frac{1}{2(Dt\pi)^{0.5}} \exp \left[ \left[ \frac{x - vt}{2(Dt)^{0.5}} \right]^2 \right] \quad (\text{III.92})$$

Sustituyendo III.92 y III.88 en III.91, evaluándola en  $x=L$  y expresándola en función de las variables adimensionales definidas por Coats<sup>(14)</sup>:

$$C' = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{1 - I}{2(I/\gamma)^{0.5}} \right] + \frac{1}{2(\pi\gamma I)^{0.5}} \exp \left[ - \left( \frac{1 - I}{2(I/\gamma)^{0.5}} \right)^2 \right] \quad (\text{III.93})$$

Tal como demostró Brigham, esta ecuación predice el comportamiento de la concentración fluyente en cualquier plano del medio poroso. La figura III.10 muestra una gráfica de concentración fluyente y volúmenes de poro inyectados.

La gráfica se elaboró empleando un valor de  $\gamma=14$ . En esta gráfica se puede observar que a un valor de  $I=1$  se tiene un valor de concentración fluyente mayor a 0.5 (aproximadamente 0.575), lo cual concuerda con lo anteriormente mencionado.

Utilizando la ecuación III.92 se comprueba que el balance de materia se cumple rigurosamente.

Es importante notar que cuando se aplican ciertas condiciones de frontera al modelo de difusión, se obtiene como resultado un tipo de concentración, que si se pretende comparar con los datos experimentales, tendrá que tratarse de una concentración fluyente. La diferencia entre ambas concentraciones estriba en las condiciones de frontera que se hayan empleado para obtener la solución del modelo de difusión, por ejemplo, para un sistema emifinito, la concentración "in-situ",  $C$ , se obtendrá cuando se utilicen las siguientes condiciones:

$$C(0, t) = C_0 + \frac{D}{V} \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} \quad ; \quad t > 0 \quad (\text{III.94})$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad t > 0 \quad (\text{III.95})$$

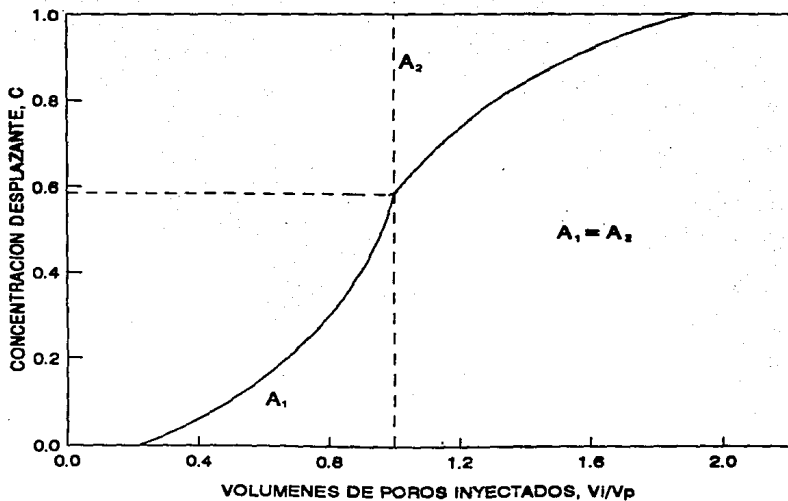


FIGURA III.10 CONCENTRACION DEL FLUIDO DESPLAZANTE EN EL AFLUENTE, UTILIZANDO LA ECUACION III.93<sup>(12)</sup>.

En tanto que la concentración fluyente, C, se obtiene cuando se empleen las siguientes condiciones de frontera:

$$C'(0,t) = C_0 \quad ; \quad t > 0 \quad \text{(III.96)}$$

$$C'(\infty,t) = 0 \quad ; \quad t > 0 \quad \text{(III.97)}$$

Ambas concentraciones están relacionadas mediante la ecuación de transporte (III.91).

Bajo estas circunstancias, es de relevancia establecer la diferencia entre ambas concentraciones, dado que para calcular el coeficiente de dispersión se recurre al ajuste mediante el modelo de difusión de los datos de laboratorio, obtenidos mediante pruebas de núcleos; por lo tanto, la solución que se utilice para ajustar estos datos debe estar basada en una concentración fluyente, ya que ha demostrado que la diferencia en las soluciones obtenidas aplicando los dos diferentes conjuntos de condiciones de frontera es de importancia cuando el coeficiente de dispersión adimensional es pequeño (menor que 20), situación que corresponde al proceso de desplazamiento en núcleos cortos.

Brigham analizó el medio semi-infinito con los dos tipos de condiciones de frontera interna dadas por las ecuaciones III.94 y III.96 respectivamente, llegando a las siguientes conclusiones:

Primero: utilizando el modelo de difusión y las condiciones establecidas en las ecuaciones III.96 y III.97, con una condición inicial  $C(x,0)=0$  obtuvo la siguiente solución:

$$C(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x - vt}{2(Dt)^{0.5}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left( \frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x + vt}{2(Dt)^{0.5}} \right) \quad \text{(III.98)}$$

Después empleó el modelo de difusión con las condiciones correspondientes para obtener una concentración "in-situ" (ecuaciones III.94 y III.95) con la misma condición inicial que para el caso anterior, obteniendo:

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

(III.99)

Diferenciando la ecuación III.99 se obtiene:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = - \frac{1}{2(\pi Dt)^{0.5}} \exp \left[ - \left( \frac{x - vt}{2(Dt)^{0.5}} \right)^2 \right] - \frac{vt}{(\pi Dt)^{0.5}} \left( \frac{x - vt}{2(Dt)^{0.5}} \right) \\ \exp \left[ - \left( \frac{x - vt}{2(Dt)^{0.5}} \right)^2 \right] + \frac{1}{2(\pi Dt)^{0.5}} \left[ \frac{v}{D} (x + vt) + 1 \right] \\ \exp \left( \frac{vx}{D} \right) \exp \left[ - \left( \frac{x + vt}{2(Dt)^{0.5}} \right)^2 \right] - \left( \frac{v}{2D} \right) \left[ \frac{v}{D} (x + vt) + 1 \right] \\ \exp \left( \frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x + vt}{2(Dt)^{0.5}} \right) - \left( \frac{v}{2D} \right) \exp \left( \frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x + vt}{2(Dt)^{0.5}} \right)$$

(III.100)

Sustituyendo las ecuaciones III.100 y III.99 en la ecuación III.91, se obtiene la ecuación correspondiente a la concentración fluyente:

$$C' = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x - vt}{2(Dt)^{0.5}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left( \frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x + vt}{2(Dt)^{0.5}} \right)$$

(III.101)

La ecuación III.98 es idéntica a la ecuación III.101, por lo que se concluye que es mejor establecer las condiciones adecuadas desde un principio, que derivar la concentración "in-situ" para obtener posteriormente la concentración fluyente y así ajustar correctamente el modelo a los datos experimentales.

c) MODELO DE BRIGHAM Y SMITH<sup>(15)</sup>

Brigham y Smith derivan una ecuación integral basados en:

$$\frac{C(r,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{Qt/2\pi\phi h - r^2/2}{2(\alpha_1 r^3/3)^{0.5}} \quad (\text{III.102})$$

Esta ecuación relaciona la concentración del trazador medida en el pozo productor con un volumen del fluido inyectado en un estrato, la ecuación por ellos derivada es:

$$\frac{C}{C_{mp}} (PV) = \int_a^b \frac{dF_D}{dQ_i} \exp \left[ \frac{-3L(Q_i - PV)^2}{\pi^2 \alpha_d} \right] dQ_i \quad (\text{III.103})$$

Para un patrón de inyección de cinco pozos Brigham y Smith empíricamente relacionan a  $F_D$  y  $Q_i$  con la ecuación:

$$\log [\log(1.07/(1.07 - F_D))] = -0.0410 + 0.581 \log(Q_i - 0.72) \quad (\text{III.104})$$

Válida únicamente para  $0.72 < Q_i < 2.29$ .

Obteniendo  $dF_D/dQ_i$  en la ecuación III.104 y sustituyendo en la III.103 se obtiene una expresión aplicable a un patrón de inyección de cinco pozos:

$$\frac{C}{C_{mp}} (PV) = \int_{0.72}^{2.29} \left[ 1.302728 \left[ (Q_i - 0.72)^{-0.419} \right] \left[ 10^{-0.909913 (Q_i - 0.72)^{0.581}} \right] \right] dQ_i$$

$$\exp \left[ \frac{-3L(Q_1 - PV)^2}{\pi^2 \alpha_d} \right] \quad (III.105)$$

Dexter L. Yuen<sup>(16)</sup> desarrollo un algoritmo para computadora basado en la ecuación anterior. Este algoritmo determina la capacidad de almacenamiento y la conductancia de un yacimiento estratificado compuesto de n estratos. En el desarrollo se considera un modelo de yacimiento como el mostrado en la figura III.11.

Considerando que el gasto de inyección i en el estrato j es proporcional al (Kh)<sub>j</sub> se tiene:

$$i_j = i (Kh)_j / \Sigma Kh \quad (III.106)$$

el fluido inyectado en el estrato j, V<sub>j</sub> es:

$$V_j = i_j \text{ tiempo} = i (Kh)_j / \Sigma Kh \text{ tiempo} = V (Kh)_j / \Sigma Kh \quad (III.107)$$

El volumen poroso inyectado en la capa j, PV<sub>j</sub> se puede describir como:

$$PV_j = \frac{V_j 5.615}{A(h\phi)_j Sw} = \frac{5.615}{A(h\phi)_j Sw} V \frac{(Kh)_j}{\Sigma Kh} = \frac{5.615 K_j}{\phi_j \Sigma Kh ASw} V \quad (III.108)$$

En el desarrollo de este algoritmo se supone que la aparición de un pico de concentración en las curvas de campo corresponde a un pico de concentración de un estrato (esta suposición no es del todo válida, pero se acerca en gran parte a la realidad), por lo que si hay n picos en las curvas de campo se puede considerar que existen n capas. La localización de un pico de concentración varía con L/α<sub>d</sub>, L. Yuen empíricamente encontró la siguiente relación:

$$PV_p = 0.72 + 0.580541(L/\alpha_d)^{-0.430043} \quad (III.109)$$



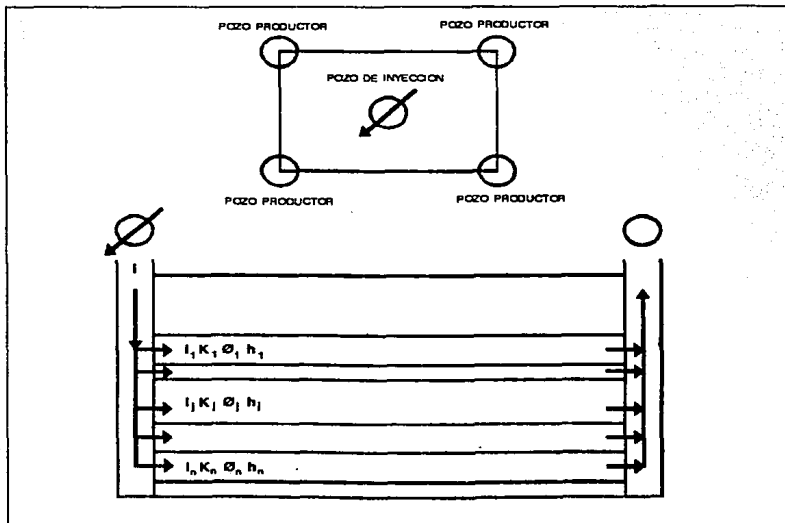


FIGURA III.11 MODELO DE YACIMIENTO ESTRATIFICADO COMPUESTO DE  $N$  ESTRATOS<sup>(18)</sup>

La ecuación III.108 puede ser puesta en función del volumen poroso inyectado al cual ocurre el pico de concentración, y de  $PV_p$  quedando como:

$$\frac{K_j}{\phi_j \Sigma K h} = \frac{PV_p}{V_p j} \frac{ASw}{5.615} \quad (III.110)$$

Tomando en cuenta la ecuación 15 del trabajo de Brigham y Smith la cual relaciona a  $C_{mp}$  con la cantidad de trazador que entra en el estrato, se tiene:

$$m = 800 h \phi Sw C_{mp} L^{1.5} \alpha_d^{0.5} \quad (III.111)$$

Si de la ecuación anterior despejamos a  $C_{mp}$ , medida en partes por millón, para el estrato  $j$  se tendrá:

$$C_{mpj} = \frac{m_j}{0.0004 (h\phi)_j Sw L^{1.5} \alpha_d^{0.5}} \quad (III.112)$$

y el valor de la concentración de trazador en la capa  $j$ ,  $C_j$  se expresa como:

$$C_j = \frac{C_j}{C_{mpj}} \quad C_{mpj} = \frac{C_j}{C_{mpj}} \frac{m_j}{0.0004 (h\phi)_j Sw L^{1.5} \alpha_d^{0.5}} \quad (III.113)$$

la cantidad de trazador que invade al estrato  $j$ ,  $m_j$  se puede considerar como:

$$m_j = m \frac{(Kh)_j}{\Sigma Kh} \quad (III.114)$$

combinando esta última ecuación con la III.113  $C_j$  queda como:

$$C_j = \frac{C_j}{C_{mpj}} \frac{m}{0.0004 Sw L^{1.5} \alpha_d^{0.5}} \frac{K_j}{\phi_j \Sigma K h} \quad (III.115)$$

Por lo que la cantidad total de trazador que se tendrá en el pozo productor será:

$$C = \sum C_j \frac{(Kh)_j}{\sum Kh} \quad (III.116)$$

sustituyendo la ecuación III.115 en la III.116 se llega a:

$$C = \sum \frac{C_j}{C_{p,j}} \frac{m}{0.0004 Sw L^{1.5} \alpha_d^{0.5}} \frac{K_j}{\phi_j \sum Kh} \frac{(Kh)_j}{\sum Kh} \quad (III.117)$$

en la ecuación anterior la incógnita es  $(Kh)_j / \sum Kh$  de tal forma que si se tienen n valores de C se tendrán n ecuaciones similares esta.

Si se utiliza el valor de los picos de concentración de las curvas de campo ( $C_{pi}$  donde  $i=1, 2, \dots, n$ ) la ecuación III.117 queda como:

$$C_{pi} = \sum \left( \frac{C_j}{C_{p,j}} \right) \frac{m}{0.0004 Sw L^{1.5} \alpha_d^{0.5}} \frac{K_j}{\phi_j \sum Kh} \frac{(Kh)_j}{\sum Kh} \quad (III.118)$$

De donde la ecuación anterior genera un sistema de n ecuaciones con n incógnitas, donde n es el número de picos que se tienen en las curvas de campo. El  $(\phi h)_j$  característico de cada estrato puede ser calculado como:

$$(\phi h)_j = \frac{(Kh)_j}{\sum Kh} \frac{\phi_j \sum Kh}{K_j} \quad (III.119)$$

donde  $(\phi h)_j$  es la capacidad de almacenamiento del estrato j y a  $(Kh)_j / \sum Kh$  se le denomina conductancia del estrato j.

### III.4 MODELOS REPRESENTATIVOS DE MEDIOS POROSOS CON FRACTURAS NATURALES

Las formaciones con fracturas naturales presentan discontinuidades extremas en propiedades físicas, tales como la porosidad y la permeabilidad. Cuando se tiene el proceso de flujo de un trazador a través de un sistema naturalmente fracturado, los procesos dominantes serán la dispersión (transporte convectivo más difusión) en la red de fracturas y la difusión en los bloques de la matriz. Normalmente, el proceso de difusión en la matriz actuará como efecto retardador de la aparición del trazador en el pozo productor, lo cual se agudizará si existe algún tipo de adsorción del soluto de la roca, debido al incremento del área efectiva de contacto entre los granos de la roca y el soluto.

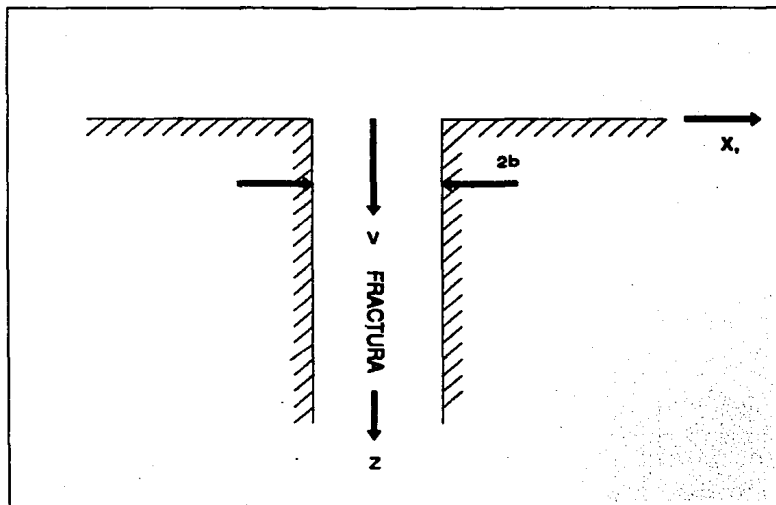
Las técnicas convencionales y disponibles para el estudio del fenómeno de difusión-dispersión en medios homogéneos no son, en general, totalmente aplicables para modelar este proceso en sistemas reales con fracturas naturales.

#### a) MODELO DE TANG Y COLABORADORES <sup>(17)</sup>

Tang y colaboradores, desarrollaron una solución semianalítica para el problema de transporte de un contaminante en fracturas discretas, considerando los procesos de dispersión y difusión. Estas soluciones fueron usadas en la determinación de las distancias recorridas por el contaminante y los tiempos de irrupción correspondientes.

El sistema idealizado de Tang se muestra en la figura III.12, las principales consideraciones de este modelo son las siguientes:

- a) El ancho de la fractura es muy pequeño en comparación con la longitud del sistema.

FIGURA III.12 MODELO DE TANG Y COLABORADORES<sup>(17)</sup>

- b) La difusión transversal y la dispersión dentro de la fractura aseguran un mezclado completo a lo ancho de la fractura a todo tiempo.
- c) La permeabilidad de la matriz porosa es muy baja y el transporte en la matriz será principalmente por difusión molecular.
- d) El transporte en la fractura es mucho más rápido que el de la matriz.

Los siguientes fenómenos fueron considerados:

1. Transporte convectivo sólo en la fractura.
2. Mecanismo de dispersión longitudinal en la fractura.
3. Difusión molecular en la fractura, en dirección del eje de fractura.
4. Difusión molecular de la fractura a la matriz.
5. Adsorción sobre la cara de la matriz.
6. Adsorción en la matriz.
7. Decaimiento radioactivo.

Tang también considera que los procesos de dispersión mecánica y difusión molecular en la fractura usualmente se conjunta como dispersión hidrodinámica.

Las ecuaciones que gobiernan el sistema propuesto por Tang son las siguientes:

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + \frac{V_{mf}}{R} \frac{\partial C_m}{\partial z} - \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} + \lambda C_m - \left. \frac{\phi D'}{bR} \frac{\partial C'}{\partial x_f} \right|_{x_f=b} = 0 ; 0 \leq z \leq \infty \quad (\text{III.120})$$

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} - \frac{D'}{R'} \frac{\partial^2 C'}{\partial x_f^2} + \lambda C' = 0 \quad b \leq x_f \leq \infty \quad (\text{III.121})$$

b) MODELO DE JENSEN Y HORNE <sup>(18)</sup>

Jensen y Horne desarrollaron un modelo matemático para describir el flujo de trazadores a través de medios porosos. Es un modelo de doble-porosidad que se presenta esquematizado en la figura III.13, en la que se ilustra 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 difusión esta presente.

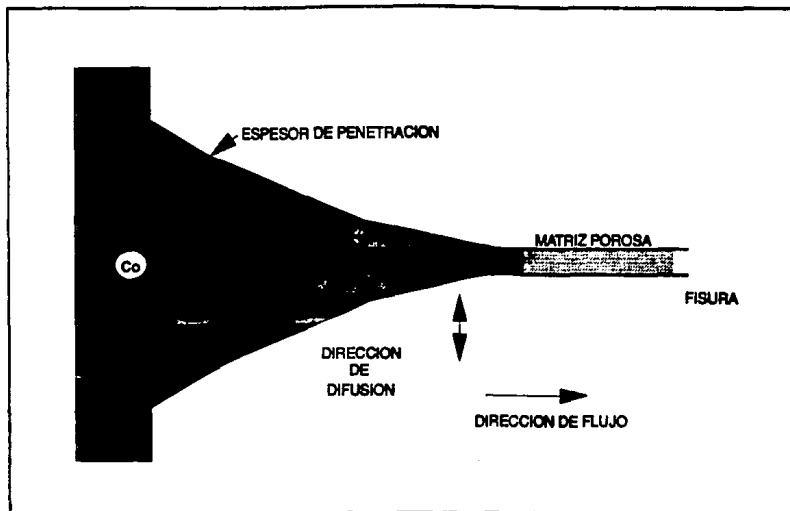
Con base en el balance de materia, considerando los fenómenos de convección en la fractura y, simultáneamente, difusión y adsorción en los poros de la matriz, Jensen y Horne describen estas condiciones de flujo mediante las siguientes ecuaciones:

$$R \frac{\partial C_f}{\partial t} - \frac{2D_m}{\delta r} \frac{\partial C_p}{\partial y} \Big|_{y=0} + U_f \frac{\partial C_f}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.122})$$

$$Da \frac{\partial^2 C_p}{\partial y^2} = \frac{\partial C_p}{\partial t} \quad (\text{III.123})$$

Las condiciones iniciales y de frontera son un pulso rectangular finito de trazador, de duración  $\Delta t$  inyectado en la entrada de la fractura a  $t=0$  y tanto la fractura como la roca se encuentran originalmente sin concentración de trazador.

Estas condiciones se expresan con las siguientes ecuaciones:

FIGURA III.13 MODELO DE JENSEN Y HORNE<sup>®</sup>.



Condiciones Iniciales:

$$C_p = (x, y, 0) = C_r(x, y, 0) \quad (\text{III.124})$$

Condiciones de Frontera:

$$C_p(x, 0, t) = 0 \quad (\text{III.125})$$

$$C_r(0, y, \Delta t) = C_0 \quad (\text{III.126})$$

siendo  $\Delta t$  la duración del pulso.

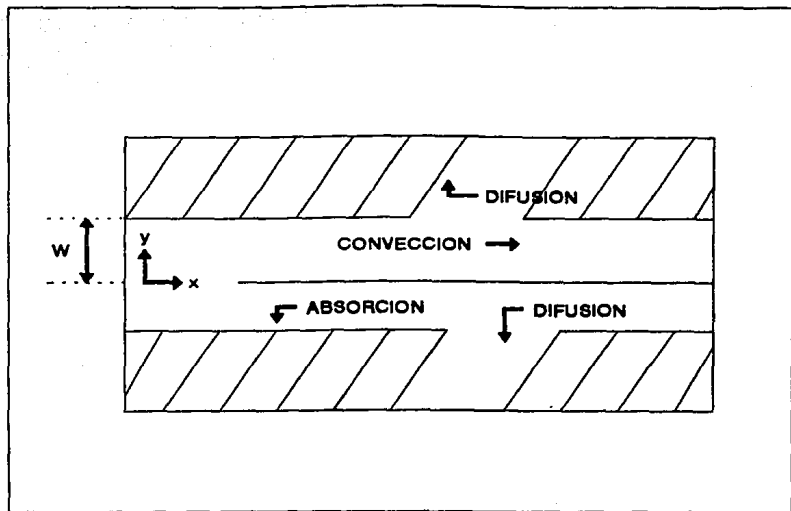
c) MODELO BIDIMENSIONAL DE WALKUP Y HORNE<sup>(19)</sup>

Horne y Walkup desarrollaron un modelo bidimensional que representa el sistema de fracturas del yacimiento con un esquema idealizado, tal como se muestra en la figura III.14. En este esquema representativo del yacimiento, se consideran dos volúmenes de control, una región móvil en la que se incluyen los fenómenos de convección en la dirección "x", difusión en la dirección "y", adsorción del trazador en las paredes de la roca y una región inmóvil en la cual actúan los procesos de difusión en la dirección "y", así como la adsorción.

Efectuando un balance de materia, tanto en la región móvil como en la inmóvil y suponiendo que no existe producción del trazador dentro del volumen de control, así como la densidad del fluido constante, Walkup y Horne llegan a las expresiones que gobiernan el flujo del trazador en medios fracturados:

$$(\phi_m + \rho_b PK_a) \frac{\partial C_m}{\partial t} = \phi_m D_y^y \frac{\partial^2 C_m}{\partial y^2} - \phi_m V_x \frac{\partial C_m}{\partial x} \quad (\text{III.127})$$

$$[\phi_{im} + \rho_b (1 - P) K] \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = D_{im}^y \phi_{im} \frac{\partial^2 C_{im}}{\partial y^2} \quad (\text{III.128})$$

FIGURA III.14 MODELO DE WALKUP Y HORNE<sup>(10)</sup>.

## CAPITULO IV

### SECUENCIA DEL ESTUDIO DE MULTITRAZADO PARA LA CARACTERIZACION DE YACIMIENTOS PETROLEROS

#### IV.1 INFORMACION DEL YACIMIENTO EN ESTUDIO DE RADIOTRAZADO

##### IV.1.1 IMPORTANCIA DE LA GEOLOGIA DE EXPLOTACION

Puesto que la explotación de los yacimientos petrolíferos depende o está en relación del conocimiento más preciso de los factores que afectan la mecánica de los fluidos, es obvio que entre dichos factores se encuentran las características geológicas del yacimiento.

La geología de explotación es una rama de la geología petrolera, cuyo objetivo es auxiliar en algunas fases de la explotación de los yacimientos petrolíferos, proporcionando la información de carácter geológico que se requiere, tal como:

- a) Clasificación de los yacimientos: desde el punto de vista litológico o de trampas de hidrocarburos.
- b) Cortes compuestos y detallados de cada pozo.
- c) Secciones estratigráficas y estructurales.
- d) Planos de configuración de isopacas e isócoras, de contactos de fluido del yacimiento y de avance de fluidos de inyección.
- e) Estudios relativos a las rocas almacenadoras.
- f) Estudios de zonas de fracturas, fallas, plegamientos, etc.

- g) Zonificación vertical y segmentación lateral de los yacimientos de acuerdo con sus características geológicas generales, para el estudio acerca de la mecánica de los fluidos del yacimiento.

#### VI.1.2 RECUPERACION SECUNDARIA DE HIDROCARBUROS

La recuperación secundaria comprende una serie de técnicas y procedimientos que se aplican con el propósito de recuperar hidrocarburos de aquellos pozos que no producen naturalmente. Una posibilidad consiste en un sistema de inyección de agua de manera que obligue a fluir al aceite residual de los yacimientos hacia los pozos productores.

La recuperación secundaria de hidrocarburos debe apoyarse forzosamente en modelos geológicos de yacimientos, debido a que la descripción geológica requerida en esta etapa de la explotación, debe incluir principalmente los siguientes aspectos:

- Tipo de estructura y fallas geológicas.
- Presencia de fracturas.
- Porosidad y permeabilidad.
- Zonificación del yacimiento.

Las características generales que deben tener las rocas almacenadoras son: tener suficientes espacios porosos para poder almacenar un volumen apropiado de hidrocarburos y las facilidades de almacenamiento deben ser tales que, los fluidos contenidos se produzcan cuando el yacimiento ha sido perforado para los fines de explotación.

Generalmente, la mayor parte de los fluidos se encuentran en areniscas o rocas carbonatadas, simplemente porque éstas son las rocas más comunes que llenan las condiciones de buenas rocas almacenadoras en el subsuelo.

Una roca almacenadora debe tener una porosidad y un espesor mínimos para poder ser explotable y tener un considerable volumen de hidrocarburos. El valor de estos mínimos dependen de las condiciones geológicas locales.

Muchas de las rocas en un yacimiento productor, tienen porosidades mayores al 10% y espesores mayores de 30 metros. La porosidad es un factor que controla la capacidad de inyección de agua.

En rocas carbonatadas heterogéneas, donde se tiene un amplio rango de permeabilidades, es probable que se presenten canalizaciones del agua de inyección del pozo inyector al productor, a través de las secciones altamente permeables, quedando los hidrocarburos atrapados en las zonas de menor permeabilidad.

La elección del arreglo de los pozos y de los intervalos de inyección y de producción, se debe hacer con más bases, ya que para ello se tomaría en cuenta también la zonificación del yacimiento.

Después de definir una zonificación de valores de porosidad o permeabilidad, la recuperación secundaria debe programarse con base en las subzonas dentro del yacimiento; por medio del estudio geológico, se conocerá la posición estructural que guardan los pozos, sus características y cuales deben ser inyectores y cuales deben ser productores.

#### IV.2 TIPOS DE ARREGLOS DE POZOS DE UN CAMPO PETROLERO

Cuando un yacimiento petrolero es sometido a un programa de recuperación secundaria, a base de inyección de agua; se ensaya y se hacen diferentes arreglos de pozos de inyección y de producción en modelos regulares, formando así un sistema de instalaciones compuestos y alternados entre sí.

Históricamente, el primer tipo de sistema de instalación regular que se ensayó fue el de un arreglo de pozos lineales como se ilustra en la figura IV.1.

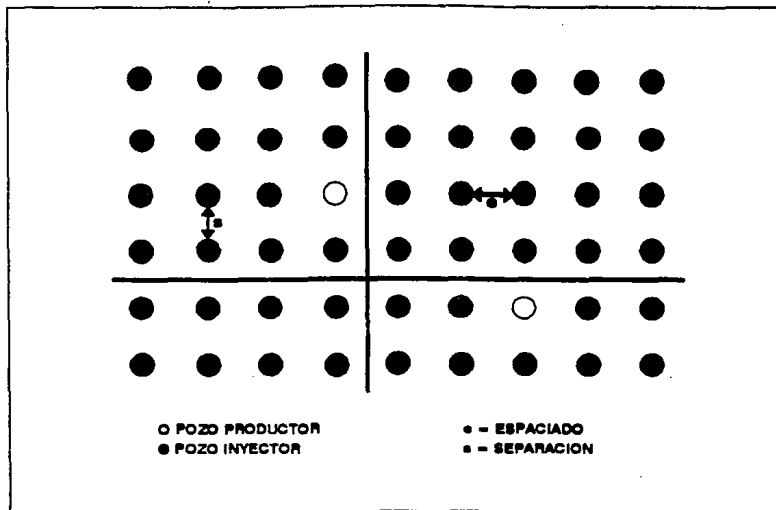


FIGURA IV.1 REPRESENTACION DE UN SISTEMA DE INSTALACION DE POZOS LINEALES.

Se observa que los pozos de inyección y de producción son colocados con espacios iguales, regulares y paralelos entre sí.

El arreglo que se ilustra esquemáticamente en la figura IV.2 está formado por un sistema de instalación regular de una línea de cinco pozos (pentagonal), donde el pozo productor está rodeado por cuatro pozos inyectoros.

En la figura IV.3 se tiene un arreglo donde las líneas son cambiadas paralelamente por la mitad del espaciamento entre pozos, y la separación de la línea es también la mitad del espaciamento entre pozos. Este arreglo de cinco pozos alternantes, consiste en un pozo inyector uniformemente rodeado por cuatro pozos productores.

Este es el arreglo más comúnmente usado; no obstante, hay un arreglo de pozos que se usan en los campos petroleros para un estudio de radiotrazado, y es una forma hexagonal (siete pozos alternantes), como se ilustra en la figura IV.4 donde se observa que el pozo inyector está en el centro y los otros seis pozos son productores.

Este arreglo de pozos se usa actualmente en estudios de radiotrazado en un campo petrolero.

#### IV.3 INFORMACION REQUERIDA DEL YACIMIENTO PARA LA PLANEACION DE UN ESTUDIO DE RADIOTRAZADO

Es preciso reunir la mayor cantidad posible de información del campo o región donde se planea realizar estudios de radiotrazado.

A continuación se describe la información de las características principales del yacimiento, que se recomienda analizar cuidadosamente antes de realizar cualquier estudio de radiotrazado.

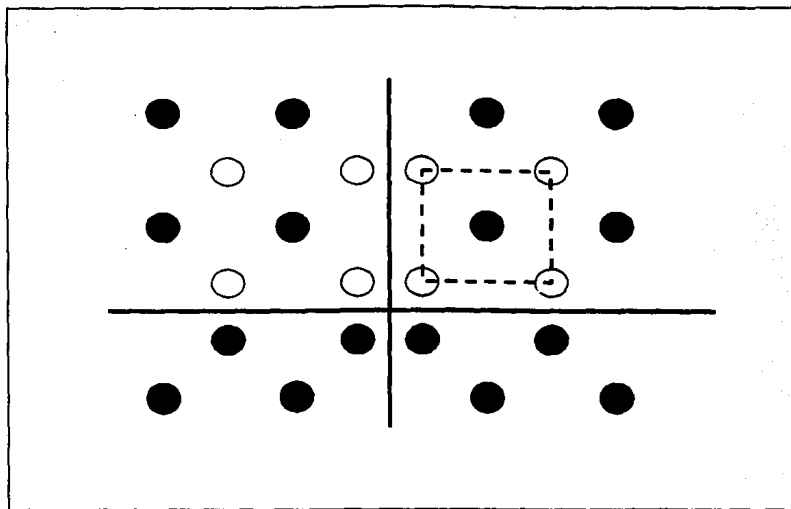


FIGURA IV.2 SISTEMA DE INSTALACION DE CINCO POZOS LINEALES Y ALTERNADOS.



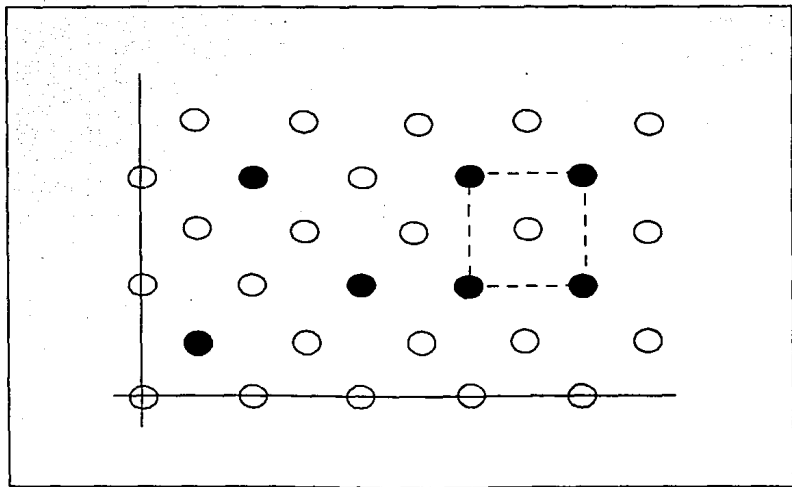


FIGURA IV.3 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN SISTEMA DE  
INSTALACION DE CINCO POZOS ALTERNADOS ENTRE SI.

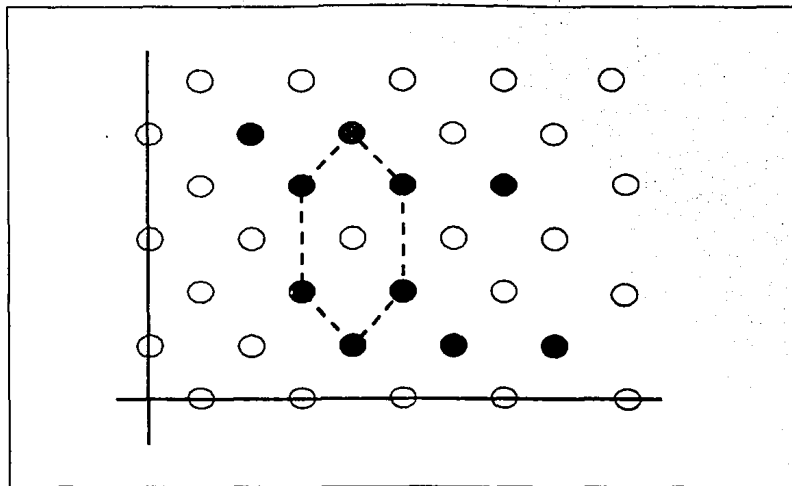


FIGURA IV.4 SISTEMA DE INSTALACION DE POZOS EN FORMA HEXAGONAL.

**a) CARACTERISTICAS DEL YACIMIENTO**

- Litología (arenas, areniscas, etc.).
- Porosidad.
- Permeabilidad.
- Saturación de agua.
- Espesor del yacimiento (efectivo y total).
- Area y volumen del yacimiento.
- Condiciones de presión.

**b) MAPAS Y DIAGRAMAS**

- Diagrama del sistema de inyección.
- Diagrama de un pozo típico de inyección.
- Diagrama de un pozo típico de producción.
- Mapas estructurales y de isopacas.
- Mapa de la región.
- Mapa del campo petrolero incluyendo caminos de acceso a los pozos.

**c) INFORMACION GENERAL DEL CAMPO**

- Plano del yacimiento y características del mismo.
- Número de pozos productores e inyectores de interés en operación.

- Estado mecánico de los pozos productores e inyectores.
- Patrón de inyección.
- Instalaciones de aire o gas en el lugar de inyección.
- Antecedentes de inyección de agua.
- Localización física de los pozos involucrados.
- Tipo de conexiones y estado de válvulas.
- Datos de los fluidos de inyección y de producción por pozo.
- Información de datos completos sobre posibles experimentos con radioisótopos efectuados con anterioridad.

#### IV.4 RADIOTRAZADO EN UN CAMPO PETROLERO

El trazador se introduce en uno o varios pozos de inyección, de tal manera que fluya a través de la formación junto con los fluidos del yacimiento y los de inyección para medir el tiempo de tránsito de los fluidos entre los puntos de inyección y los pozos productores.

El trazador se debe diluir hasta conseguir una concentración relativamente baja, de manera que al mezclarse con un volumen grande del fluido de inyección, la concentración sea aún más baja (del orden de  $\mu\text{Ci/ml}$ ), para evitar al máximo los riesgos si se presentan canalizaciones por fracturamiento entre el punto de inyección y los pozos productores.

Después de la inyección se recolectan muestras de los fluidos de producción en los pozos cercanos o en aquellos en que se supone que tiene alguna relación o conexión con el punto de inyección y se mide la cantidad de trazador (concentración) en cada una de las muestras.

Con esta información, es posible conocer el tiempo de tránsito del trazador y de algunas propiedades del yacimiento, en función de la dilución que experimenta el trazador. Los resultados, (concentración del trazador en las muestras), se grafican en función del tiempo transcurrido a partir de la fecha de inyección.

La interpretación de las curvas de concentración contra el tiempo, permitirá obtener un mejor conocimiento del desplazamiento del fluido de inyección a través del yacimiento y confirmar o desechar la influencia de los patrones de flujo.

Si la curva es un pulso de forma regular, se deduce que la formación a través de la cual se desplazan los fluidos es homogénea; por el contrario, si el trazador se difunde o diluye en un volumen muy grande de fluidos en el yacimiento, significa que hay una probabilidad alta de canalizaciones, o bien que la formación es heterogénea, como se muestra en la figura IV.5.

#### IV.5 ASPECTOS IMPORTANTES EN LOS PROGRAMAS DE RADIOTRAZADO

A continuación se describen las principales recomendaciones que es preciso cumplir para la realización práctica de un radiotrazado.

##### ELECCIÓN DEL TRAZADOR

La elección del trazador es un requisito previo para cualquier aplicación. Tanto el radioisótopo, como su fórmula química se deben elegir tomando en cuenta la función que desempeñará.

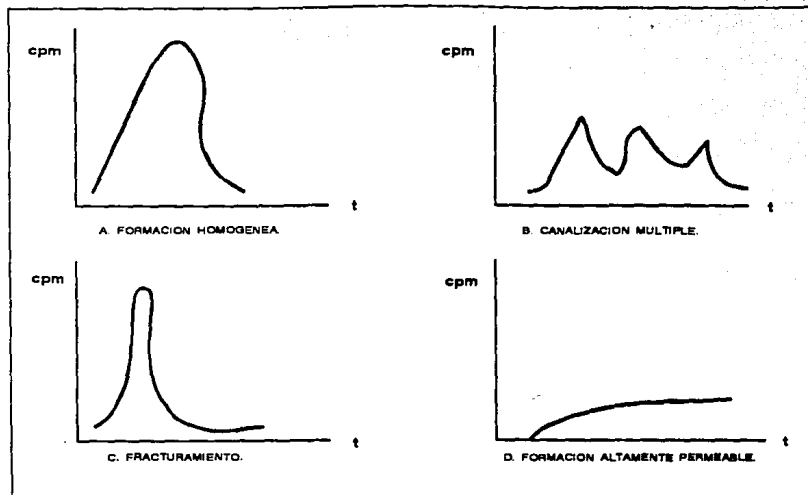


FIGURA IV.5 COMPORTAMIENTO TIPICO DE LAS CURVAS DE PRODUCCION DE TRAZADORES RADIOACTIVOS.

La elección esta vinculada con su vida media, actividad específica, tipo y energía de la radiación y finalmente, con su comportamiento físico-químico.

a) VIDA MEDIA

La vida media debe ser lo suficientemente grande para que permita la detección del radioisótopo todo el tiempo que dure la prueba, pero de tal modo que una vez concluida la experiencia la actividad decaiga a niveles por abajo de los permisibles después de un tiempo razonable.

b) ACTIVIDAD ESPECIFICA

Es una característica importante que las muestras deben poseer tal que permitan un conteo con un error estadístico aceptable.

c) TIPO Y ENERGIA

Estas características estan relacionadas directamente con las necesidades de detección y con el equipo de conteo.

d) COMPORTAMIENTO FISICO-QUIMICO

Es necesario que el trazador se desplace a igual velocidad que el fluido, esto implica que no debe efectuar intercambio iónico ni sufrir absorción física o química. Además, no debe alterar las propiedades y condiciones del fluido tales como densidad, viscosidad y temperatura.

e) OTROS ASPECTOS

- Es conveniente que sea fácilmente soluble y que no precipite, para poder marcar grandes cantidades de fluidos con una pequeña masa de trazador.

- No debe contaminar el medio marcado, ni afectar a seres vivos.
- Su adquisición debe ser fácil.
- Su costo deberá ser relativamente bajo comparado con los beneficios que se obtendrán.
- Su capacidad de dispersión debe ser completa a través del fluido de inyección.

#### IV.6 EQUIPO DE INYECCION Y DISPOSITIVOS

##### IV.6.1 BATERIA DE INYECCION DE AGUA

Las instalaciones de inyección se dividen en cuatro sistemas principales: captación, tratamiento, bombeo y distribución. El diagrama mecánico de flujo se presenta en la figura IV.6.

###### a) CAPTACION

Consiste en pozos profundos equipados con bombas verticales tipo turbina, accionados con motores eléctricos con sus correspondientes desarenadores.

###### b) TRATAMIENTO

Comprende de una batería de filtros de presión de grava y arena para eliminación de sólidos suspendidos, así como de dosificadores de reactivos para bactericidas, inhibidores de corrosión y surfactantes.

###### c) BOMBEO

Comprende una serie de bombas de alta presión accionadas por turbinas.



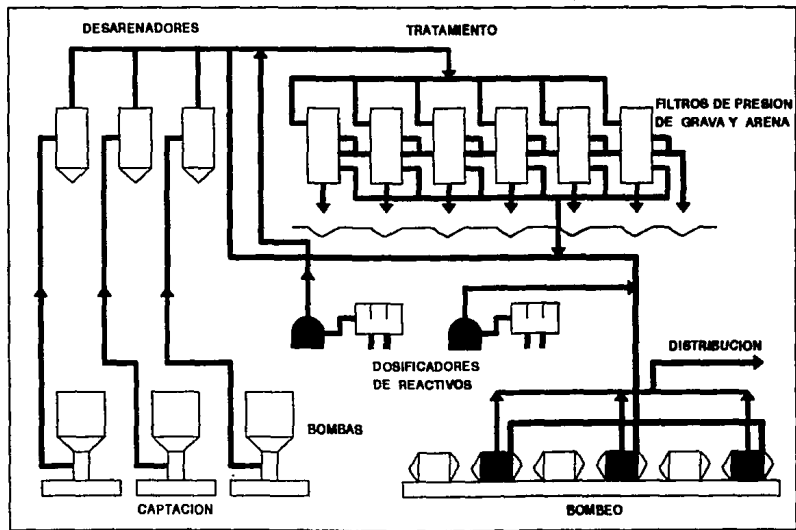


FIGURA IV.6 DIAGRAMA MECANICO DE FLUJO DE UNA BATERIA DE INYECCION DE AGUA<sup>(1997)</sup>.

#### 4) DISTRIBUCION

Finalmente, se tiene una red de distribución para cada campo petrolero, que consiste de un acueducto troncal de acero, distribuido a los pozos de captación (inyectores).

La figura IV.7 muestra una red de distribución de un arreglo de un campo.

#### IV.6.2 ANEJO DE VALVULAS (POZOS)

Cada campo petrolero tiene instalados árboles de válvulas o pozos terminales llamados pozo inyector y pozo productor, como se puede observar en la figura IV.8.

#### IV.6.3 DISPOSITIVOS PARA INYECCION

Los dispositivos de inyección no presentan problemas desde el punto de vista de diseño o construcción.

Los principales requisitos que deben satisfacer son los siguientes:

- Efectividad durante la operación.
- Simplicidad en el diseño, construcción y sobre todo en la operación.
- Seguridad para evitar posibles accidentes en vista de las presiones altas y de la peligrosidad de los fluidos que se manejan.
- Compacto para su fácil transporte de un sitio a otro en los campos petroleros.

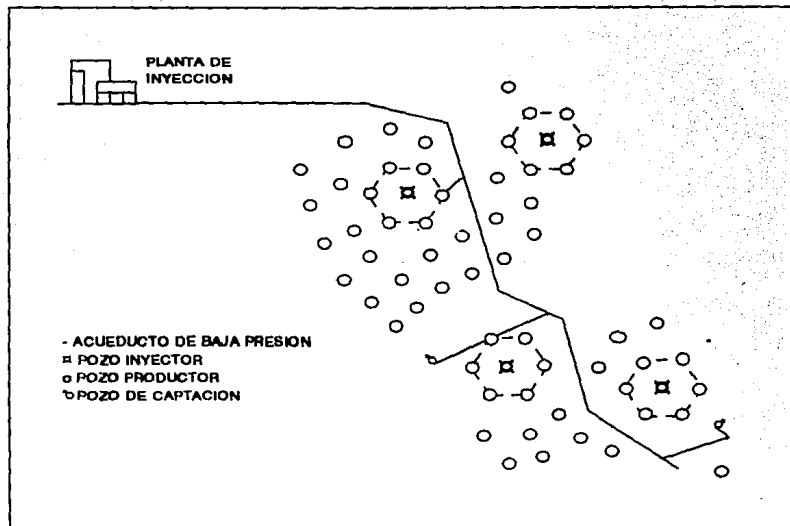


FIGURA IV.7 RED DE DISTRIBUCION DE AGUA EN UN MODELO DE CAMPO PETROLERO.

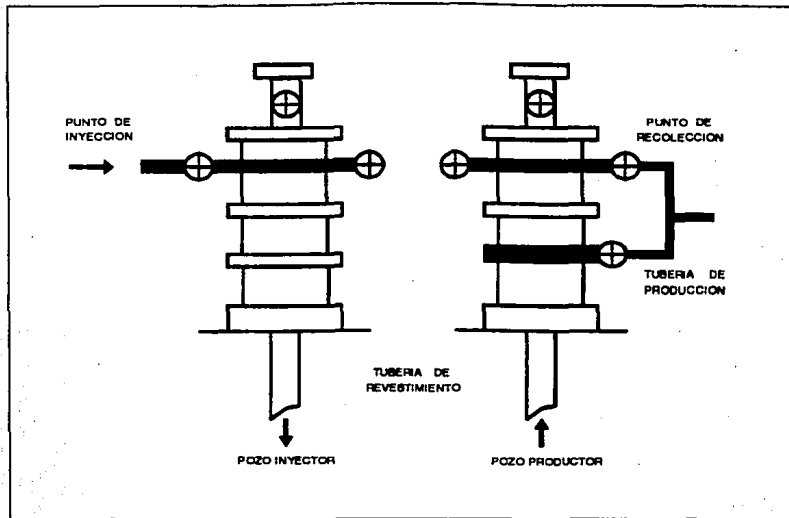


FIGURA IV.8 ARBOL DE VALVULAS.

- Resistente con el fin de que soporte el tránsito por caminos en mal estado y manipulaciones poco cuidadosas.

En la figura IV.9 se muestra un diagrama de dispositivo de inyección de trazador.

El equipo de inyección consta de las siguientes partes principales:

- Un tanque de almacenamiento (100 litros de capacidad), con indicador de niveles para vigilar el desplazamiento del fluido durante la inyección.
- Una válvula de paso y un filtro para eliminar partículas sólidas que puedan obturar la bomba dosificadora.
- Un rotámetro colocado antes de la bomba dosificadora y un manómetro (después de la bomba), necesarios para medir el gasto y la presión de inyección del trazador.
- Una bomba dosificadora que proporcione la cantidad de trazador durante un período predeterminado.
- Una válvula check para prevenir posibles bloqueos durante la inyección o flujos imprevistos del pozo hacia la bomba.

#### IV.6.4 HERRAMIENTA DE INYECCION DE TRAZADORES

En la figura IV.10 se muestra la herramienta que fue diseñada para facilitar la carga; cuenta con un contenedor en la superficie para el trazador, una liberación positiva del mismo y para empezar a fluir se introduce a la profundidad establecida en la sarta de tubería. Ambas terminales del cuerpo principal del cilindro pueden ser removidas.

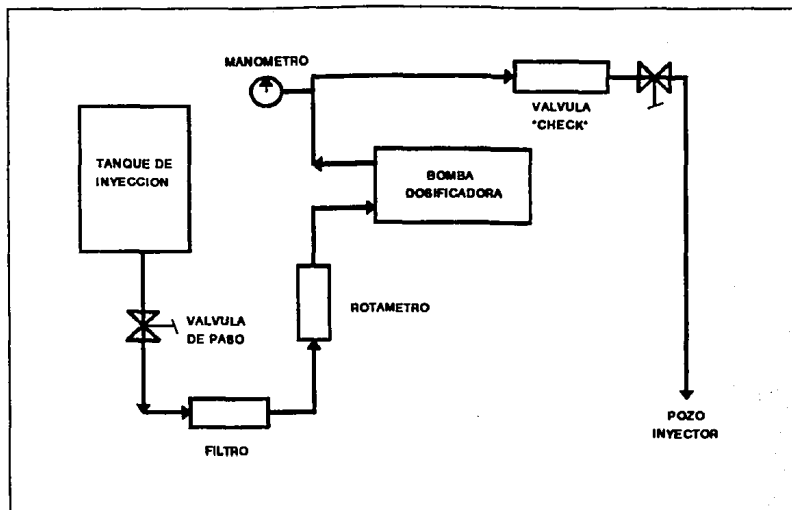


FIGURA IV.9 DIAGRAMA DE UN DISPOSITIVO DE INYECCION DEL TRAZADOR.

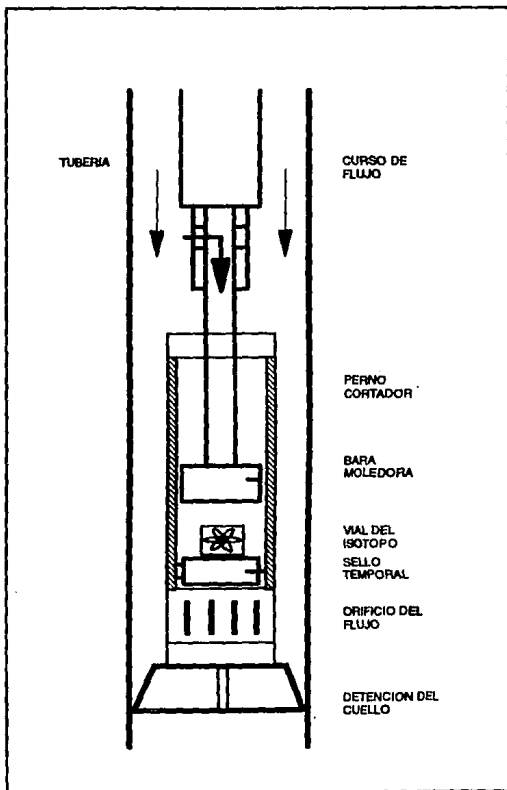


FIGURA IV.10 HERRAMIENTA PARA INYECCION DE ISOTOPOS CON LINEA DE ACERO<sup>(21)</sup>.

La terminal inferior sirve para limpiar las puertas ranuradas después de una inyección y reposición del pistón y la terminal superior sirve para cargar la herramienta. Una vez cargada, correrá dentro del pozo sobre la línea de acero hasta que exista contactado con el cople. El agua de inyección se estabiliza antes de aplicar peso en la parte superior del perno rompible de seguridad, para que el pistón rompa las ampolletas que contienen el isótopo.

Una vez que la varilla hace que se rompan por presión, las ampolletas golpean el sello del pistón en la base de la herramienta, el peso aplicado golpeará al cilindro, este a su vez golpeará a la base de la herramienta y expondrá un número de puertas de flujo en la pared del cilindro.

El fluido pasará a través del cuerpo de la herramienta y fluirá el trazador dentro de la corriente de inyección. Con este método se minimiza la exposición del personal a la radiación. La herramienta esta diseñada para presentar bajos niveles de radiación al ser recuperada.

#### IV.6.5 DISPOSITIVO PARA RECOLECCION DE MUESTRAS

No hace falta un dispositivo especial para el muestreo. Es posible utilizar cualquier recipiente de volumen apropiado, construido con materiales resistentes e impermeables y que no permitan el paso de luz.

#### IV.7 ELECCION DEL PUNTO DE INYECCION

El trazador se inyecta en el o los pozos seleccionado(s) de antemano, de acuerdo con la información que se busca.

El punto de inyección se escoge lo más cerca posible de la cabeza del pozo (árbol de válvulas) para evitar contaminaciones en la tubería, válvula, bombas y demás equipo o accesorios.



En la mayoría de los casos se agrega al trazador un colorante soluble en agua (del tipo "fluorescente") con el propósito de detectar posibles fugas del sistema.

El período de inyección del trazador es función del espaciamiento entre el pozo de inyección y los productores, de la porosidad y permeabilidad del yacimiento y del trayecto que recorre el trazador.

#### IV.8 SELECCION DE POZOS DE MUESTREO

Se recolectarán muestras en los pozos productores más cercanos al punto de inyección y además en aquellos que de acuerdo con los datos de producción guarden una cierta relación con el pozo de inyección.

Desde luego es obvio que el muestreo se debe efectuar en los pozos alejados del pozo de inyección en los que la producción de agua aumente bruscamente en fecha posterior a la inyección del radiotrazador, en cuyo caso, el muestreo debe ser más frecuente y abarcar todos los pozos en que se detecte dicho aumento.

El período de recolección de muestras en los pozos productores cercanos se planea de acuerdo con las características particulares de cada campo, pero es conveniente establecer un programa básico, que con ciertas modificaciones sea aplicable en la mayoría de los casos.

##### IV.8.1 MUESTREO

###### a) PREVIO AL ESTUDIO

Antes de la inyección del trazador se deberá de muestrear para determinar el fondo de radiación del yacimiento y establecer condiciones del estudio.

#### b) DURANTE EL ESTUDIO

Después de la inyección del radiotrazador, el muestreo deberá ser frecuente, por lo menos dos veces al día. La segunda semana se recolectará una muestra diaria. Posteriormente durante un período mínimo de dos meses, se recolectarán tres muestras a la semana.

Finalmente se recolectará una muestra semanal hasta concluir el estudio de radiotrazado.

#### IV.8.2 VOLUMEN DE LAS MUESTRAS

Se considera conveniente que el volumen de las muestras sea de 1000 ml con el objeto de disponer de la cantidad suficiente de agua, para repetir los análisis en caso de duda.

De cada muestra recolectada, se envían al Laboratorio de Radioquímica 20 ml, el resto del agua se almacena un tiempo razonable en el mismo recipiente, hasta que se conozcan los resultados de los análisis radioactivos.

La muestra debe ser representativa, tomada directamente de la línea de producción (T.P.) y no del volumen muerto en la cabeza del pozo productor.

#### IV.9 ETAPAS DE UN ESTUDIO DE RADIOTRAZADO

En la figura IV.11 se muestran los pasos necesarios para un estudio de radiotrazado en un modelo del campo petrolero.

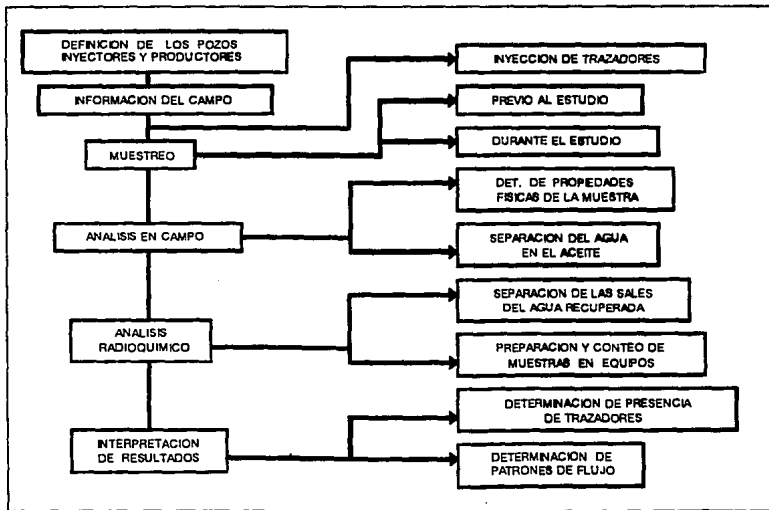


FIGURA IV.11 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN ESTUDIO DE RADIOTRAZADO.

#### IV.10 ANALISIS DE LAS MUESTRAS

##### a) LABORATORIO EN EL CAMPO (ANALISIS QUIMICO)

Las muestras de los pozos de producción, generalmente están constituidas por una emulsión que contiene agua y aceite en diferentes proporciones.

Un laboratorista recolectará las muestras en el campo y hará las siguientes actividades:

- 1 Separación y recuperación del agua en el aceite.
- 2 Determinación de porcentaje y pH del agua.
- 3 Obtención de la salinidad del agua (ppm).
- 4 Determinación de la temperatura.
- 5 Determinación de la densidad.
- 6 Cálculo de los grados API del aceite.
- 7 Envasado y etiquetado de muestras recuperadas.
- 8 Registro de control de recolección de muestras de agua y de aceite.
- 9 Envío al laboratorio de radioquímica.

##### b) LABORATORIO DE RADIOQUIMICA (ANALISIS RADIOQUIMICO)

Las muestras que se reciben del campo se introducen a los equipos analizadores de altura de pulsos Monocanal o Multicanal, para detectar la radioactividad de las partículas gamma de alta energía (detector de cristal de centelleo de NaI).

c) LABORATORIO DE CONTEO DE BAJO NIVEL (ANALISIS RADIOQUIMICO)

Para contar las muestras de agua radioactiva se dispone de un laboratorio de conteo de bajo nivel en el Instituto Mexicano del Petróleo.

El equipo de detección consiste esencialmente de un contador de centelleo líquido marca "Sistema Wallac 1400™", figura IV.12, cuya operación es totalmente automática.

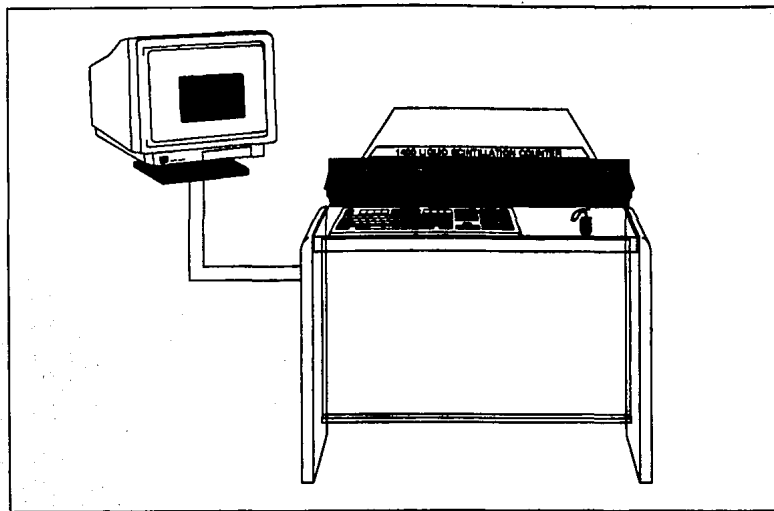


FIGURA IV.12 SISTEMA WALLAC 1400™.

## CAPITULO V

### APLICACION DE LA RADIOACTIVIDAD EN LA INGENIERIA PETROLERA

Para ilustrar la aplicación de un estudio de radiotrazado que permite determinar, tanto la presencia de trazador, como ciertas características del yacimiento, se presenta una prueba piloto con trazadores<sup>(21)</sup>.

#### V.1 INFORMACION DEL CAMPO Y ARREGLO DE POZOS

El campo Redwater D-3 es un complejo de la edad Leduc, es una porción escabrosa triangular que se extiende aproximadamente 600 Km<sup>2</sup> y consiste de 290 m de agua carbonatada somera con el sello formado de lutita. El aceite se encuentra en el perímetro estructural y estratigráfico más alto del arrecife y es encontrado aproximadamente a 60 Km al noreste de Edmonton, Alta.

Este campo fue descubierto en 1948 y desarrollado en un área de 16 hectáreas, es uno de los campos más grandes de Canadá, con aceite original estimado de  $205 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, de los cuales  $75 \times 10^6$  m<sup>3</sup> quedarán como aceite residual.

En 1984 se perforaron cuatro pozos en un área fuera del campo Redwater para evaluar la captura adicional de fluidos de los pozos. Después de diez meses de producción los pozos fueron convertidos a inyectores formando un modelo piloto de cinco pozos (cuatro inyectores y un productor) en un espacio de 8 hectáreas. Los cuatro pozos inyectores se acondicionaron con empacadores inflables los cuales se deslizaron a 50 m para dividir la columna original de aceite en dos zonas, ambas zonas fueron prellenadas con agua antes que el solvente fuera inyectado. El modelo fue llevado al contacto agua-aceite y con bombas sumergibles se hicieron producir todas las fases.

El estrato de la edad Leduc superior fue depositado en capas discretas, correspondiendo a ciclos ascendentes y poco profundos, conteniendo sucesiones verticales de facies deposicionales, figuras V.1 y V.2.

Se señala el área piloto o área modelo que muestra cortes a través del yacimiento con las tres facies deposicionales predominantes desde la cima hasta el fondo de la columna original de aceite. A medida que el arrecife fue creciendo, la margen somera migró hacia el suroeste. La parte posterior del arrecife consiste de una laguna con caliza depositada detrás de la margen somera donde presenta porosidad en secuencia estratificada con capas de caliza porosa e impermeable.

Los tipos más abundantes de poro en estas facies son cavernas, y finos huecos intergranulares; el rango de porosidades es de 0-8% y el rango de permeabilidades de 2 a 500 md, la permeabilidad horizontal excede a la vertical. Las secuencias de alta porosidad son las principales contribuidoras a la afluencia del agujero. Sin embargo, las fracturas tienen un pequeño efecto sobre el flujo horizontal, esto no rige la contribución al flujo vertical a través de zonas de baja porosidad y laminaciones de lutita. Las márgenes someras de las facies ocurren sólo en la esquina noreste del área piloto consistentes de una matriz granular en forma de malla porosa.

Las calizas del talud consisten en detritos y arenas de carbonatos depositadas pendiente abajo de la margen somera; la porosidad intergranular es dominante para ambas facies y con rangos de 5-18%, con excelente continuidad vertical y lateral. Los valores de permeabilidades son de 100 md, pero pueden exceder a 1 darcy; Las permeabilidades vertical y horizontal casi son iguales.

El acuífero del arrecife Redwater es el más grande a través del borde del campo, donde las calizas de alta porosidad y permeabilidad del talud y la margen somera están en comunicación con él; esto impone un flujo del noreste a suroeste a través del campo.



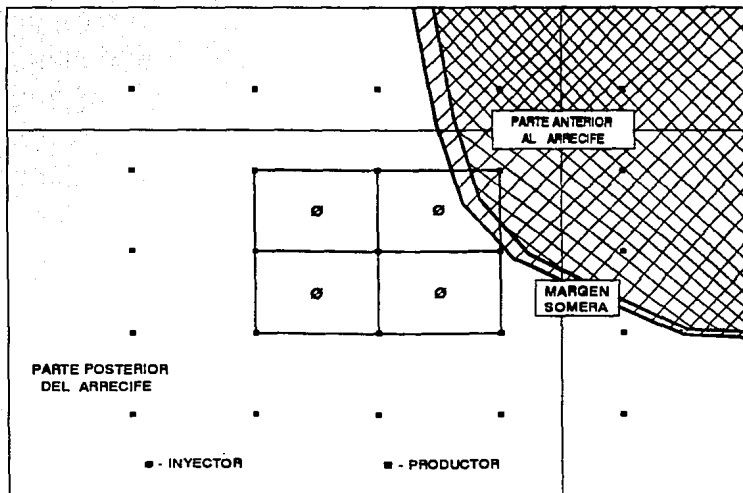


FIGURA V.1 DISTRIBUCION DE FACIES EN LA CIMA DE LA ZONA.

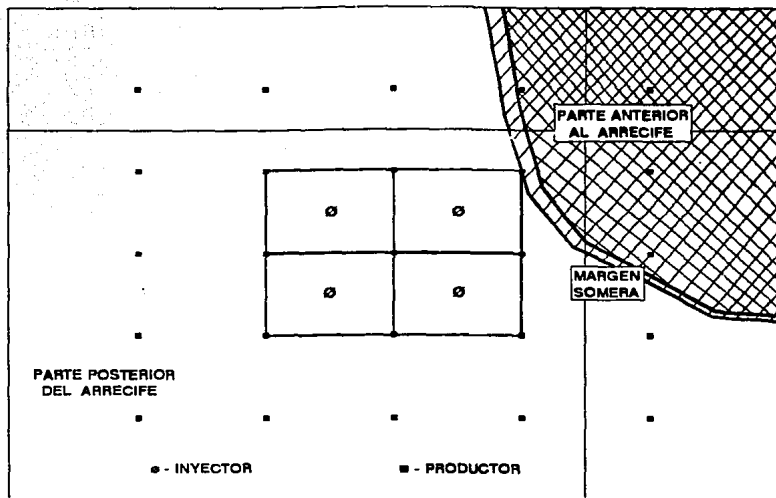


FIGURA V.2 DISTRIBUCION DE FACIES EN EL FONDO DE LA ZONA.

## V.2 SELECCION DEL TRAZADOR

Se decidió usar un trazador de radioisótopo exclusivamente, ya que no pierde sus propiedades físicas y no tiene alteraciones químicas.

Los factores que influenciaron esta decisión fue la dilución desconocida del trazador químico en el yacimiento, oculto para la respuesta química del agua producida y la gran cantidad de trazador químico requerido para la detección de los niveles insensibles.

Los radioisótopos de Cobalto (Co) y Cesio (Cs) (Co-57, Co-60, Cs-134 y Cs-137) fueron los seleccionados como trazadores candidatos. El comportamiento del tritio (H-3) como trazador de agua fue bien documentado<sup>(22, 23)</sup> el cual diverge significativamente de Co y Cs debido a que al momento de penetrar emiten radiación gamma; en contraste el H-3 emite una débil partícula beta.

En la Tabla V.1 se presenta un resumen de las propiedades radiológicas<sup>(24)</sup>, radioactividades, fórmulas químicas y fechas de inyección de estos radioisótopos.

Los trazadores Co y Cs fueron seleccionados cuidadosamente para minimizar la probabilidad de pérdida por reacción de la formación con cualquier roca o fluidos del yacimiento.

La radioactividad inyectada se determinó al recoger las muestras inmediatamente después de inyectar y trazar el área con los mínimos niveles de detección. Estos resultados anticiparon el comportamiento de flujo.

TABLA V.1 RESUMEN DE PROPIEDADES RADIOLOGICAS E INYECCION DE TRAZADORES

Isótopo	Vida Media (años)	Partícula Emitida	Energía (kev)	Dosis del Gasto Externo (rem/h)
H-3	12.3	Beta	5.7**	NA*
Co-57	0.74	Gamma	122.1	0.09
Co-60	5.26	Gamma	1173.2	1.32
			1332.5	
Cs-134	2.06	Gamma	604.7	0.87
			795.8	
Cs-137	30.2	Gamma	661.6	0.33

Zona	Patrón	Fecha	Isótopo	Actividad (GBq)	Formula Química
Cima	Sureste	Ene.20,1986	Co-60	3.7	Nitrato de Cobalto
		Ene.20,1986	Cs-137	18.5	Complejo EDTA
Cima	Noreste	Ene.21,1986	H-3	1480.0	Cloruro de Cesio
		May.13,1986	H-3	1480.0	HTO (Agua Tritiada)
Cima	Noroeste	Ene.21,1986	Cs-134	18.5	HTO (Agua Tritiada)
Cima	Suroeste	Ene.22,1986	Co-57	18.5	Cloruro de Cesio
Fondo	Sureste	Nov.12,1986	Cs-134	37.0	Complejo EDTA
Fondo	Noreste	Dic. 1,1986	Cs-137	37.0	Cloruro de Cesio
Fondo	Noroeste	Dic. 2,1986	Co-60	18.5	Cloruro de Cesio
Fondo	Suroeste	Nov.13,1986	H-3	3100.0	Potasio Hexacianuro de Cobalto
					HTO (Agua Tritiada)

\* La dosis de los gastos están en rem/h y son determinados a 1 m de la actividad de un punto fuente de 37 GBq. El rem es una unidad de la dosis equivalente de radiación; se consideran los factores físicos y biológicos asociados con la radiación ionizada.

\*\* La energía media para una partícula beta del hidrógeno-3 (H-3, tritio).

\* La liberación de la débil partícula beta durante el decaimiento del H-3 no contribuye a una dosis de radiación externa.

### V.3 PROGRAMA DE MUESTREO

Un aspecto crítico del proyecto fue el manejo del muestreo. Las frecuencias de muestreo que se presentan en la Tabla V.2 fueron usadas para establecer un patrón para pozos posteriores.

TABLA V.2 FRECUENCIA DE MUESTREO		
Tiempo Después de la Inyección del Trazador		Frecuencia de Muestreo
1 <sup>ra</sup>	semana	1 muestra / pozo / día
2 <sup>da</sup> - 4 <sup>ta</sup>	semana	2 muestras/ pozo / semana
2 <sup>do</sup> - 3 <sup>er</sup>	mes	1 muestra / pozo / semana
4 <sup>to</sup> - 6 <sup>to</sup>	mes	1 muestra / pozo / 2 semanas
6 <sup>to</sup> - 12 <sup>vo</sup>	mes	1 muestra / pozo / mes

Las frecuencias fueron diseñadas con el modelo de dispersión de Brigham y Smith<sup>(15)</sup> para generar las curvas de respuesta del trazador en un rango de tiempos posibles de llegada. Mediante este modelo se pueden determinar características propias del yacimiento tales como: porosidad, permeabilidad, saturación de agua, volumen poroso inyectado, etc.; además se aplica a yacimientos estratificados y utiliza el arreglo de cinco pozos. Una descripción más amplia se presentó en el Capítulo III. La meta fue reunir bastantes muestras de cada pozo para permitir aumentar los resultados significativos de interpretación. La tarea de recolección de muestras de agua de los nueve pozos productores fue sencilla, debido a que sus tuberías de descarga corrían para un campo satélite común; y a una WOR 50:1; las muestras pudieron ser tomadas directamente fuera de las tuberías de descarga, esperando la afluencia de cada pozo para llevarlo al separador de prueba.

### V.4 PROCEDIMIENTO DE INYECCION

Un estricto grupo de reglas gobiernan el uso de materiales radioactivos. El Consejo de Control de Energía Atómica de Canadá licencia y monitorea las prácticas de firmas que utilizan los recursos radioactivos.

El tritio, como HTO, fue el menos peligroso de los cinco radioisótopos usados en este proyecto. El HTO fue transportado en cilindros de acero inoxidable para las tres inyecciones que se hicieron, la inyección fue realizada conectando los cilindros a la línea de flujo cerca del punto de entrada en la fuente de la cabeza del pozo (bajante), después se inyectó el trazador dentro de la línea alternándolo con baches mezclados de agua/metanol y nitrógeno.

Dicho trazador fue inyectado dos veces en la zona superior del patrón noreste. Después de aproximadamente cuatro meses, se llevó a cabo la segunda inyección.

Los trazadores gamma se inyectaron por tres métodos diferentes. Para la inyección en la zona superior, las ampollitas de vidrio conteniendo el trazador fueron colocadas en un cilindro, el cual después fue sellado y unido a la cabeza del pozo; las ampollitas fueron rotas por compresión dentro del cilindro por efecto de pistón.

Su contenido fue inyectado dentro de la corriente de inyección bombeando el fluido limpiador a través de la cavidad y dentro de la cabeza del pozo, pasando la solución concentrada de radioisótopos a través de la cabeza del pozo y el tubo de inyección. Este método no fue satisfactorio debido a que aumentó la posibilidad de contaminar las superficies internas, ya que una vez que las ampollitas se rompen y el isótopo se libera dentro del cilindro es muy difícil su suspensión. Además, el aparato estuvo expuesto a condiciones ambiente.

Las herramientas de inyección en la línea de acero fueron utilizadas para evitar estos riesgos en las tres inyecciones de trazadores gamma en el fondo de la zona. Para la primera inyección la herramienta que registra el perfil de inyección presentó un defecto en su diseño, necesitando un transferidor abierto de trazador concentrado de la vasija contenedora a la herramienta. El cual presentó un riesgo significativo al derramar trazador, provocando la contaminación del personal y del equipo.

Una nueva herramienta (descrita brevemente en el Capitulo IV) para la línea de acero fue diseñada y usada exitosamente para las dos inyecciones faltantes.

#### V.5 TECNICAS DE ANALISIS

Las muestras de los fluidos producidos fueron llevados al laboratorio de investigación en Calgary para su análisis. Las concentraciones de isótopos gamma fueron medidas con un detector litio-germanio (GeLi) y un sistema analizador multicanal (Camberra 90).

El detector fue calibrado para una solución estándar y con la excelente resolución de energía, se facilitó la obtención de información sobre la actividad de cada isótopo y las concentraciones del trazador fueron medidas confiablemente hasta 0.17 Bq/L.

El análisis de HTO consistió en hacer una sencilla destilación a la muestra para eliminar el efecto de "apagamiento" (fenómeno que se produce en el centellador líquido por efecto de la radiación beta de baja energía y que reduce el conteo total de la muestra, el cual consiste en la absorción, dispersión y degradación de los fotones luminosos por sales, gases o sustancias químicas disueltas en la mezcla muestra-centellador o por coloración de ésta y consecuentemente la pérdida de información que llega a los tubos fotomultiplicadores) debido a la presencia de sales, hidrocarburos o por la centellación causada por la radiación de otros trazadores. Posteriormente se hizo el conteo en un contador de centelleo líquido (Beckman LS 5801), el nivel de fondo para el tritio fue 170 Bq/L.

Una vez medidas las concentraciones de los trazadores, fueron corregidas para fijar datos de referencia y relacionar el decaimiento exponencial con el tiempo impuesto por el decaimiento radioactivo. Los parámetros que más afectaron la concentración fue la vida media del isótopo y el tiempo de referencia de los datos medidos.

Por ejemplo, la corrección que se hizo al Cs-137 tuvo un pequeño efecto debido a que la vida media es de treinta años; sin embargo, para el Cs-134 si tuvo un efecto significativo debido a que su vida media es de dos años.

## V.6 INTERPRETACION

La concentración de trazadores en las muestras de agua producida estuvieron significativamente arriba de los niveles de fondo en el tiempo en que los programas de muestreo fueran terminados. En muchos casos, una función exponencial describió satisfactoriamente la dependencia de la concentración del trazador para tiempos posteriores en el agua de producción en las regiones de las curvas.

La figura V.3 muestra dos ejemplos, 1 siguiendo una inyección en la cima de la zona en el patrón noroeste y la otra, una inyección en el fondo de la zona en el patrón suroeste, también muestra el pozo productor en relación a los patrones de inyección y la concentración de trazadores en Bequerels por litro de agua producida, en escala logarítmica, vs. la producción acumulada de agua en  $10^3 \text{ m}^3$ . La producción de agua es referida para el tiempo de las inyecciones en la cima de la zona. Las líneas discontinuas muestran como las curvas de respuesta fueron extrapoladas a niveles de fondo, de tal manera que las ultimas recuperaciones pueden ser estimadas.

Esto fue posible para determinar la respuesta de un pozo para inyecciones del trazador a diferentes tiempos y en diferentes patrones en las curvas de concentración del trazador. Por ejemplo; la figura V.4 muestra la respuesta inicial del pozo central a las dos inyecciones de HTO en la cima de la zona del patrón noreste, y más tarde para la inyección en el fondo de la zona del patrón suroeste. Las líneas discontinuas otra vez muestran la declinación aproximada para cada una de las curvas; sin embargo, la actividad se incrementa al final de esta curva de respuesta ocurrida después de la terminación.



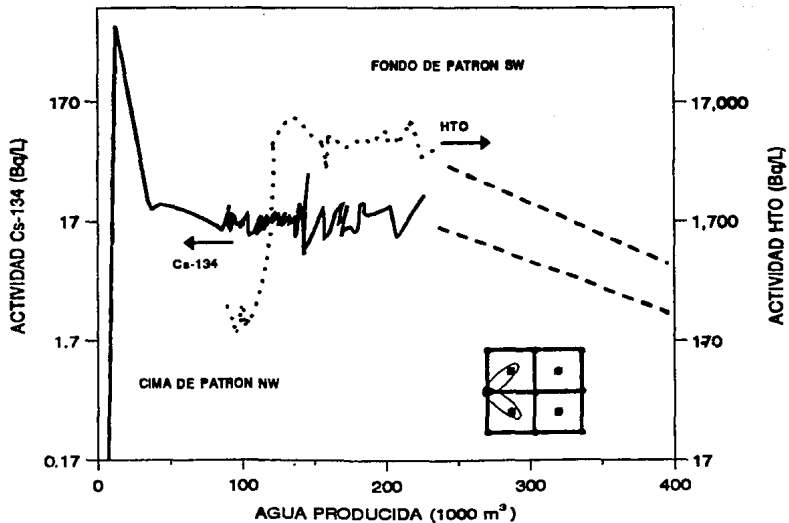


FIGURA V.3 DECLINACION UNIFORME DEL TRAZADOR A TIEMPO TARDIO.

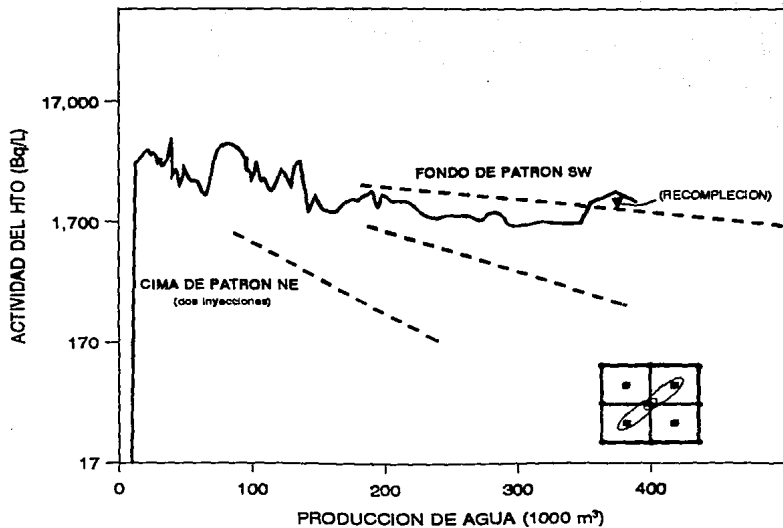


FIGURA V.4 RESPUESTA PARA INYECCIONES MÚLTIPLES DE TRAZADOR.

La Tabla V.3 resume las recuperaciones acumulativas del trazador para cada zona y patrón de inyección.

TABLA V.3 RECUPERACION DEL TRAZADOR				
Zona	Patrón	Isótopo	Actividad (GBq)	% de Actividad Inyectada
Cima	Sureste	Co-60	1.5	42
		Cs-137	21.0	> 100
Cima	Noreste	H-3	2430.0	82
Cima	Noroeste	Cs-134	14.6	79
Cima	Suroeste	Co-57	Traza	Traza
Fondo	Sureste	Cs-134	21.2	58
Fondo	Noreste	Cs-137	24.8	67
Fondo	Noroeste	Co-60	4.7	26
Fondo	Suroeste	H-3	2530.0	80

El HTO y los dos isótopos de Cs se comportaron muy bien en las últimas recuperaciones de casi el 80% de sus actividades originalmente inyectadas, el 20% no se recuperó; por lo que puede ser el resultado de un flujo fuera de las áreas patrón que fueron indetectables, la salida de las curvas de declinación exponencial para las regiones y la retención por la formación.

La significativa recuperación de las dos formas diferentes de Co-60 y el fracaso en la recuperación de cualquier cantidad significativa de Co-57, sugiere que la formación retuvo estos químicos; el Co-57 debido a su excesivo costo y mal comportamiento se discontinuó.

La recuperación aparente del 100% del Cs-137 inyectado en la cima de la zona del patrón suroeste es probablemente causada por un problema en el control de calidad. Las actividades de los radioisótopos inyectados son medidas "in-situ" porque hay cierto riesgo con el muestreo directo. Las discrepancias entre las actividades inyectadas y las calculadas pueden ser significativas.

Las concentraciones del trazador en las muestras de agua producida fueron determinadas por el patrón de veinticinco pozos de seis a ocho meses después de cada inyección.

Los resultados de las distribuciones de la concentración del trazador, como una función del agua producida, fueron extrapolados a niveles de fondo y se integraron para determinar la recuperación acumulada de trazador para cada pozo productor.

Las figuras V.5 y V.6 resumen la distribución del flujo referidas a los resultados anteriores, las flechas apuntan a los pozos en comunicación con cada pozo inyector; el ancho de cada flecha refleja la recuperación acumulada estimada del trazador en ese pozo. El porcentaje de recuperaciones suman 100% para cada patrón, las cuales son basadas en la relación de recuperación de trazador de un pozo dados los patrones y la producción acumulada del trazador.

Por ejemplo, la figura V.5 muestra que la producción en la esquina suroeste del patrón noroeste produjo 50% del trazador recuperado de la inyección en los patrones de la cima de la zona. Esto sugiere que aproximadamente el 50% del preflujo en los patrones de la cima de la zona fluye hacia el productor.

Los patrones sureste y noroeste presentan caminos de flujo preferente con dirección al suroeste. Los resultados también muestran flujo fuera de las áreas patrón, ambos son paralelos a la margen somera (que va de noroeste a sureste) y con dirección al suroeste. El pozo más al noreste es el único productor en la región del talud.

La comunicación en la cima de la zona con el pozo de la figura V.5 fue verificada solamente después de que el productor fue taponado. Desafortunadamente, la línea de flujo para el pozo falló temporalmente después de que en el fondo de la zona fueron completadas las inyecciones de trazador, y el pozo fue cerrado.

Las respuestas en las zonas (cima y fondo) significativamente diferentes del patrón noreste, muestran un camino de flujo preferente a lo largo de la margen somera de la cima de la zona (figura V.5) y una respuesta balanceada para tres pozos productores en el fondo de la zona (figura V.6).

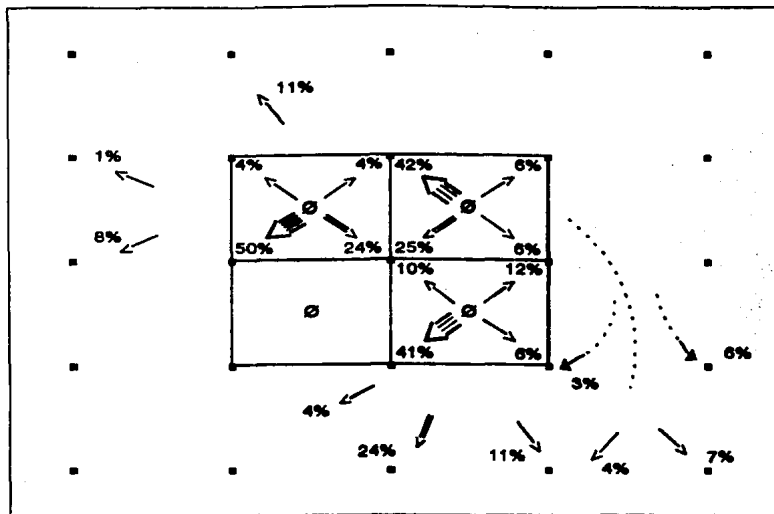


FIGURA V.5 DISTRIBUCION DE FLUJO EN LA CIMA DE LA ZONA.

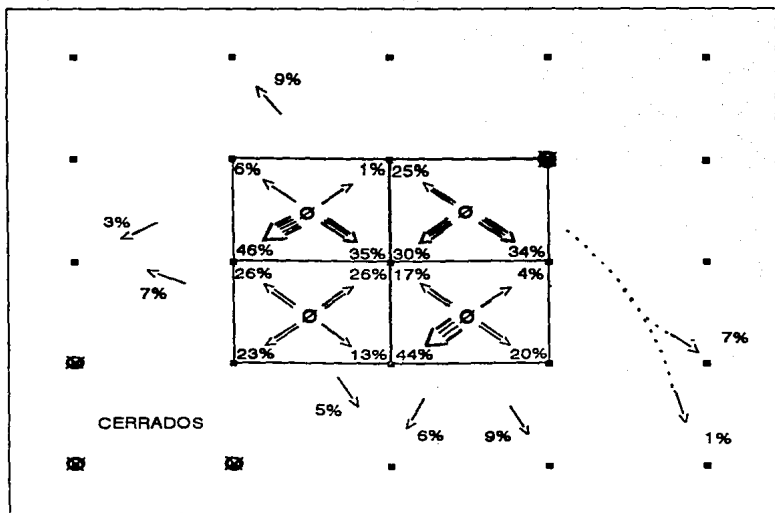


FIGURA V.6 DISTRIBUCION DE FLUJO EN EL FONDO DE LA ZONA.

Este es el resultado de la dominación de las facies de la margen somera sobre la cima de la zona y el dominio de las facies del arrecife interior sobre el fondo de la zona.

Otra gran diferencia entre las dos inyecciones establecidas es la reducción del flujo fuera de las áreas patrón, esto es evidente en los resultados, además del dominio de las facies del arrecife en el fondo de la zona. Desafortunadamente, no hay información sobre la distribución del patrón suroeste en la cima de la zona porque solo mínimas cantidades de trazador de Co-57 fueron recuperadas.

Entre las dos inyecciones establecidas, ocurrieron 2 eventos principales que complicaron la interpolación de los resultados.

El primer evento fue un ajuste del gasto de producción para distribuir uniformemente el preflujo en el fondo de la zona para los alrededores de los pozos productores. Durante el preflujo de la cima de la zona, la producción excedió significativamente a la inyección. El segundo evento fue cerrar los tres pozos productores en la esquina suroeste del área piloto para reducir la desviación del patrón.

Las evidencias de los efectos combinados de estos dos eventos fueron observados claramente por cambios en las curvas de declinación de la concentración del trazador de un número de pozos productores en la esquina suroeste del área piloto. La figura V.7 muestra un ejemplo para el pozo de la esquina suroeste del patrón sureste.

La pausa en la inclinación de la curva de concentración del trazador Cs-137 ocurre justamente después de que los cambios fueron hechos. Reduciendo el gasto de producción de este pozo resultó un flujo menor fuera del área patrón provocando menor dilución del trazador en el pozo productor, y por consiguiente un incremento en su concentración. El cambio en la inclinación en las curvas de concentración refleja una captura adicional del trazador, resultando de una reconfiguración simplificada después de que los tres pozos fueron cerrados.

Las curvas de respuesta de la cima de la zona para pozos productores fuera del área sureste mostrada no responden a los cambios, aparentemente influenciadas a un grado menor. En general, los dos eventos aparecidos son beneficiosos para el equilibrio del patrón, por ejemplo; la comunicación con el pozo de la esquina noreste en el patrón sureste no fue confirmada hasta después que los cambios fueron hechos, y las distribuciones del fluido en el fondo de la zona fue más uniforme y mejor confinada a las áreas patrón de la cima de la zona. Estas diferencias pueden resultar de cambios en las condiciones de operación y de las características del flujo de las facies.

Como se notó, baches de Cs-137 y Co-60 fueron usados para trazar el agua de inyección en la cima de la zona del patrón sureste. La figura V.7 muestra que los tiempos para el rompimiento y la concentración más alta fueron idénticas para los dos isótopos. Las formas de las dos curvas y las inclinaciones de las últimas regiones de tiempo fueron similares. Significativamente, las distribuciones de los fluidos inferidos de la respuesta de los dos trazadores fueron de excelente conformidad. La principal diferencia entre las dos recuperaciones acumuladas fueron de alta recuperación para el Cs y baja recuperación para el Co.

Las diferencias son ilustradas en la figura V.8 la cual muestra las respuestas de ambas zonas (cima y fondo) para el pozo de la esquina sureste del patrón noroeste.

El tiempo rápido de respuesta y la definición del pico de la cima de la zona sugiere que el flujo entre los pozos es dominado por canales de alta permeabilidad en las facies de la margen somera. Cambiando más lentamente las regiones para tiempos posteriores donde probablemente el resultado de la producción del trazador se deba a caminos de baja permeabilidad.

Aunque los tiempos de rompimiento en el fondo de la zona fueron comparables para aquellos de la cima de la zona, los picos de actividad no fueron predominantes.



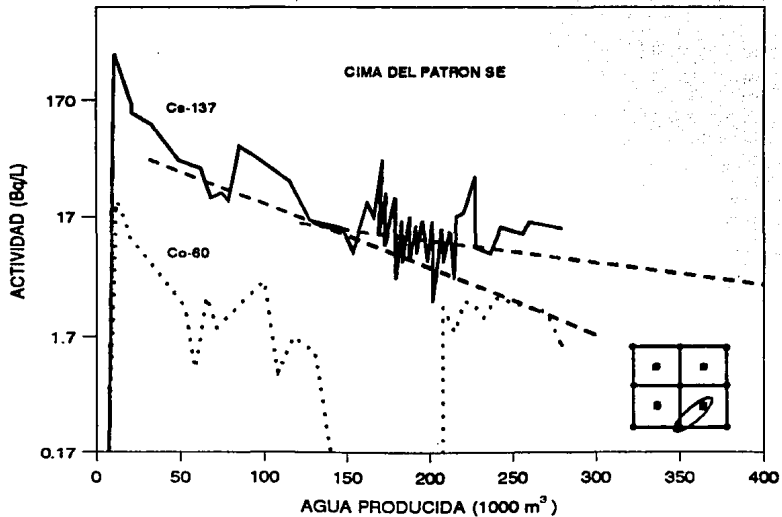


FIGURA V.7 INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS EN LAS CONDICIONES DE OPERACION.

Esto indica menor contribución de los caminos de flujo de alta permeabilidad y una contribución más significativa de las facies dominantes del arrecife interior en el fondo de la zona.

La forma de cada curva de concentración del trazador y por consiguiente la distribución de la recuperación de trazador, es significativa porque tiene implicaciones con relación al volumen contactado por el fluido inyectado. Estos resultados pueden ser usados para estimar el volumen barrido entre un par de pozos. Para una medición semejante se determina primero, para la cantidad de fluido inyectado dentro de un cuadrante para un punto, y el 50% de la última recuperación del trazador alcanza al pozo productor en el cuadrante.

Un volumen barrido estimado puede ser determinado dividiendo ese volumen por la saturación del agua representativa para el patrón.

Aplicando este análisis a las dos curvas respectivas en la figura V.8, da el volumen barrido estimado para la cima de la zona que es menor al 30% del valor en el fondo. Las flechas verticales muestran el 50% del trazador recuperado marcadas directamente sobre las curvas. Los resultados muestran claramente el efecto de las características del yacimiento sobre el comportamiento del flujo y la respuesta del trazador puede ser usada para dar idea de estas características, así como también para tener una solución cualitativa alterna a la caracterización del yacimiento se pueden aplicar los modelos matemáticos descritos en el Capítulo III, apoyándose en los datos obtenidos de los resultados tanto del laboratorio como de las curvas de respuesta de los trazadores.

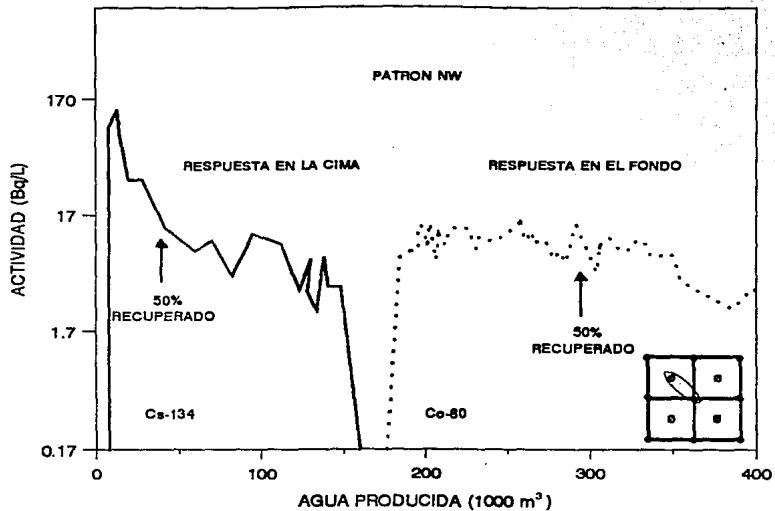


FIGURA V.8 RESPUESTA CARACTERISTICA DE LAS ZONAS CIMA Y FONDO.

## CONCLUSIONES

Los trazadores radioactivos son herramientas valiosas en la solución de problemas complicados en ingeniería y tienen importancia como técnicas principales en algunos casos y auxiliares en otros casos para diferentes ramas de la investigación petrolera.

En general el método de radiotrazado proporciona información útil para diferentes estudios como: recuperación secundaria, obtención de perfiles de inyección y de producción, localización de fracturas, canalizaciones, etc.; además de que se pueden descubrir otras aplicaciones de acuerdo con las características o particularidades de los campos petroleros.

La vida media del tritio (12.3 años), permite realizar estudios a largo plazo, pues aún después de transcurrir varios años se puede detectar. Esta característica del tritio lo convierte en uno de los pocos trazadores realmente útiles en la determinación de patrones de flujo que existen entre los pozos de inyección y de producción.

El estudio del movimiento real de un fluido a través de un medio poroso mediante trazadores radioactivos, presenta complicaciones en cuanto a su formulación y solución. Dichas complicaciones se deben a que no se sabe con certeza el movimiento real de las partículas del trazador a través del medio poroso, ya que el medio presenta diversos fenómenos físicos y químicos, los cuales son ocasionados debido a: fuerzas externas que interactúan con el fluido, la geometría del sistema poroso y a la difusión molecular que se presenta por los cambios en los gradientes de la concentración de los trazadores radioactivos.

En el ejemplo de aplicación, los resultados de los programas de trazado se utilizaron para determinar las distribuciones de flujo a través del área piloto, para preflujos de producción de agua de ambas zonas (cima y fondo) de la columna original de aceite. Estas distribuciones indican una desviación de noreste a suroeste y confirman la existencia de comunicación a través de la margen somera del arrecife.

El tiempo rápido de respuesta del trazador y la definición del pico de la cima de la zona, sugieren que el flujo entre los pozos es dominado por canales de alta permeabilidad en las facies de la margen somera. Cambian más lentamente las regiones para tiempos posteriores, donde probablemente el resultado de la producción del trazador se deba a trayectorias de baja permeabilidad.

Los resultados del ejemplo de aplicación muestran el efecto de las características del yacimiento (permeabilidad, porosidad, flujo preferencial, presencia de fracturas, etc.). Y en donde la respuesta del trazador puede ser usada para dar una idea cualitativa de dichas características.

La aplicación de los trazadores radioactivos es una herramienta auxiliar que puede utilizarse en forma conjunta con estudios de geología, registros geofísicos, sísmica y pruebas de pozos para conformar un estudio global y propiamente la caracterización del yacimiento.

## NOMENCLATURA

- A, Actividad al tiempo t, Ci, Bq, etc.  
t, Tiempo, horas, minutos, días, etc.  
A<sub>0</sub>, Actividad inicial al tiempo t<sub>0</sub>, Ci, Bq, etc.  
λ, Constante de decaimiento, t<sup>-1</sup>, seg<sup>-1</sup>, min<sup>-1</sup>, etc.  
N(t), Número de átomos radioactivos presentes al tiempo t.  
M, Peso molecular del radioisótopo.  
N<sub>0</sub>, Número de Avogrado.  
ρ<sub>A</sub>, Densidad del componente A.  
ρ<sub>B</sub>, Densidad del componente B.  
ρ<sub>m</sub>, Densidad de la mezcla.  
C<sub>A</sub>, Concentración del componente A.  
C<sub>B</sub>, Concentración del componente B.  
v<sub>A</sub>, Velocidad del componente A.  
v<sub>B</sub>, Velocidad del componente B.  
N<sub>A</sub>, Vector flujo de masa del componente A.  
N<sub>B</sub>, Vector flujo de masa del componente B.  
v<sub>h</sub>, Velocidad hidrodinámica local.  
J<sub>A</sub>, Flujo de masa por unidad de área del componente A.  
D<sub>AB</sub>, Coeficiente de difusión molecular, o difusividad para el sistema binario.  
VC<sub>A</sub>, Gradiente de concentración local.  
E, Coeficiente de dispersión convectivo longitudinal, (L<sup>2</sup>/T).  
Do, Coeficiente de dispersión molecular en la matriz, (L<sup>2</sup>/T).  
V, Velocidad media del fluido en la dirección x (velocidad superficial/porosidad del medio), (L/T).  
dp, Diámetro de la partícula, (L).  
D, Coeficiente de dispersión longitudinal, (L<sup>2</sup>/T).  
F, Factor de resistividad eléctrica de la formación, adimensional.  
φ, Porosidad del medio, adimensional.  
K<sub>l</sub>, Coeficiente de dispersión longitudinal, (L<sup>2</sup>/T).  
K<sub>t</sub>, Coeficiente de dispersión transversal, (L<sup>2</sup>/T).  
Lr, Longitud total del medio poroso, (L).  
X<sub>90</sub>, Distancia tomada a partir de la posición inicial en la interfase, donde la composición es 90% de la composición inicial.

- X<sub>10</sub>, Distancia tomada a partir de la posición inicial en la interfase, donde la composición es 10% de la composición inicial.
- K<sub>r</sub>, Coeficiente de dispersión transversal total.
- u, v, w, Componentes del vector velocidad del fluido.
- $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ , Componentes del vector velocidad media del fluido.
- u', v', w', Componentes del vector velocidad fluctuante del fluido.
- m<sub>A</sub>, Masa del componente A producida por unidad de volumen y por unidad de tiempo.
- m<sub>B</sub>, Masa del componente B producida por unidad de volumen y por unidad de tiempo.
- $\bar{C}_A$ , Concentración media del trazador que se difunde.
- C'<sub>A</sub>, Concentración fluctuante del trazador que se difunde.
- ε<sub>x</sub>, ε<sub>y</sub>, ε<sub>z</sub>, Coeficientes de difusión turbulenta.
- T, Temperatura.
- α, Difusividad térmica.
- X<sub>i</sub>, X<sub>j</sub>, Coordenadas cartesianas del sistema.
- v<sub>i</sub>, u, v, w, componentes del vector velocidad del fluido.
- i, j, x, y, z.
- x, Distancia longitudinal (L).
- ℓ, Operador de Laplace.
- q, Concentración radioactiva en la fase sólida.
- C, Concentración radioactiva en la fase líquida.
- ε, Eficiencia de mezclado en la fuente.
- L<sub>r</sub>, Diámetro de la fuente.
- n, Concentración del trazador en la superficie sólida, (M/L<sup>2</sup>).
- K, Coeficiente de dispersión, (L<sup>2</sup>/T).
- C<sub>i</sub>, Concentración "in-situ", (M/L<sup>3</sup>).
- I, Volúmenes de poros inyectados, adimensional.
- h, Factor de heterogeneidad, adimensional.
- C, Concentración media del trazador en el pozo productor.
- C<sub>mp</sub>, Concentración máxima de trazador en el estrato del yacimiento.
- L, Distancia del pozo productor al pozo inyector (L).
- α<sub>d</sub>, Constante de dispersión (L).
- F<sub>d</sub>, Fracción del fluido inyectado en la corriente de producción.
- Q<sub>i</sub>, Volumen poroso desplazado (es una variable de integración en unidades de volumen poroso).

- a, b, Límites de integración (dependen del patrón de inyección).
- PV, Volúmenes porosos desplazables de fluido inyectado.
- m, Masa del trazador medida en libras.
- C<sub>w</sub>, Concentración del soluto en solución en la fractura igual a  $C(z, t)$ , (M/L<sup>3</sup>).
- v<sub>af</sub>, Velocidad del agua subterránea en la fractura (L/T).
- C', Concentración del soluto en solución en la matriz igual a  $C'(x, z, t)$ , (M/L<sup>3</sup>).
- D', Coeficiente de difusión efectivo en la matriz, (L<sup>2</sup>/T).
- R', Coeficiente de retardamiento de la matriz.
- b, Mitad de la abertura de fractura, (L).
- x<sub>f</sub>, Coordenada tomada en la dirección del flujo, (L).
- Z, Coordenada al eje de fractura, (L).
- R, Coeficiente de retardamiento, adimensional.
- C<sub>f</sub>, Concentración de trazador en la fractura.
- C<sub>p</sub>, Concentración de trazador en los poros de la matriz.
- D<sub>a</sub>, Coeficiente de difusión aparente, (L<sup>2</sup>/T).
- D<sub>e</sub>, Coeficiente de difusión efectivo,  $D_e = D_a \rho_b$  Ka.
- $\rho_b$ , Densidad media de la roca.
- K<sub>a</sub>, Coeficiente de adsorción (reacción química de primer orden).
- $\delta r$ , Ancho de fractura, (L).
- U<sub>f</sub>, Velocidad del fluido en la fractura, X<sub>o</sub>/T<sub>w</sub>, (L/T).
- T<sub>w</sub>, Tiempo de residencia del agua, (T).
- X<sub>o</sub>, Distancia recorrida desde el pozo inyector hasta el pozo productor, (L).
- $\phi_m$ , Porosidad en la región móvil.
- $\rho_b$ , Densidad de la roca.
- P, Fracción del total de adsorción en la región móvil.
- K<sub>a</sub>, Coeficiente de transferencia de masa en el fenómeno de adsorción.
- C<sub>m</sub>, Concentración del trazador en la zona móvil.
- $\phi_{im}$ , Porosidad en la región inmóvil.
- C<sub>im</sub>, Concentración del trazador en la zona inmóvil.
- D<sub>m</sub>, Coeficiente de difusión en la región móvil (L<sup>2</sup>/T).
- Y, Coordenada tomada en la dirección perpendicular a la dirección de flujo.
- D<sub>im</sub>, Coeficiente de difusión en la región inmóvil (L<sup>2</sup>/T).



## BIBLIOGRAFIA

- 1 Dempsey, J. C., Finney, R. E., and Macfarlene, R. M.: The Applications of Radiotracers to Secondary Recovery, Producers Monthly 22, 12 (1958) 24.
- 2 Manual de Instrumentación Programada Pruebas No-destructivas Vol. I, Origen y Naturaleza de la Radiación, 1a. Ed. Pívico S.A. 1981.
- 3 William J. Price: Nuclear Radiation Detection, 2na. Ed. Mc. Graw-Hill, N.Y. 1967.
- 4 G. E. Maggio: Trazadores y Técnicas Nucleares. República Argentina, Comisión Nacional de Energía Atómica. Dependencia de la Presidencia de la Nación. Dirección de Radioisótopos y Radiaciones, Buenos Aires, 1983.
- 5 Edward Profio, Experimental Reactor Physics, Wiley, New York, 1976.
- 6 William D. Ehmann and Diane E. Vanee.: "Radiochemistry and Nuclear Methods of Analysis", Serie Chemical Analysis, Vol. 116, Ed. John Wiley and Sons, inc. New York, 1991.
- 7 Harvey E. White.: Introducción a la Física Atomica, Ph. D., Sc. D. Ed. Alhambra S. A. 1969.
- 8 James W. Daily and Donald R. F. Harleman, Dinámica de los Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería, Editorial Trillas, México 1975.
- 9 Perkins, R. K. and Johnson, O. C.: A Review of Diffusion and Dispersion in Porous Media, Trans, AIME (1963) Vol. 228.

- 10 Ogata, A., and R. B. Banks: "A Solution of the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media", professional paper 411-A, U. S. Government Printing office, Washinton D. C., 1961.
- 11 Holly, D. E., N. L. Guinasso, and E. H. Essington: Hydrodynamic Transport of Radionuclides: One-dimensional Case with Two Dimensional Approximation, Prepared for: U. S. Atomic Energy Commission Nevada Operations Office, Las Vegas Nevada, September 1971.
- 12 Gershon, N. D. y Nir, A.: Effects of Boundary Conditions of Models on Tracer Distribution in Flow Throgh Porous Media, Water Resources Research, August 1969.
- 13 Brigham, W. E.: "Mixing Equations is Short Laboratory Cares", Transactions, Vol. 257, 1974.
- 14 Coats, K. H. and Smith, B. D.: Dead-End Pore Volumen and Dispersion in Porous Media, Society Petroleum Enginnering Journal, September 1963.
- 15 Brigham, W. E. and Smith, D. H.: "Prediction of Tracer Behavior in Five-Spot Flow", paper SPE 1130 presented at the 1965 SPE Annual Meeting, Denver, October 3-6.
- 16 Yuen, D. L.: "Analysis of Five-Spot Tracer Tests to Determine Reservoir Layering", Master of Science Thesis, Stanford University, August 1978.
- 17 Tang, D. H., Frind, E. O. and Sudicky, E. A.: "Contaminant Transport in Fractured Porous Media: Analytical Solution for Single Fracture", Water Resources Research, Vol. 17, No. 3, June 1981.
- 18 Jensen, C. L.: "Matrix Diffusion and its Effects on the Modeling of Tracer Returns from the Fractured Geothermal Reservoir at Wairakei, New Zeland", SGP-TR-71 Dic. 1983 Stanford, C. A.

- 19 Walkup, G. W., Jr. and Horne, R.N.: "Characterization of Tracer Retention Processes and their Effect on Tracer Transport in Fractured Geothermal Reservoirs", Artículo SPE 13610 presentado en 1985 SPE California Regional Meeting, Bakersfield, C. A. Marzo 1985, 229-240.
- 20 James G. Tanner: "Recuperación Secundaria por Inyección de Agua. Ingeniería Petrolera, Vol. 'VIII, No. 8, Agosto 1968.
- 21 K. N. Wood, F. S. Lai, and D. W. Heacock: "Water Tracing Enhances Miscible Pilot", Esso Resources Canada Ltd, SPE 19642, October 8-11, 1989.
- 22 Willmon, G. J.: "A Study of Displacement Efficiency in the Redwater Field", Journal of Petroleum Technology April, 1967.
- 23 Guinn, V.P.: "Special Features of Tritium as a Tracer in Industrial Research", paper presented at the 1958 Symposium on Advances in Tracer Applications of Tritium.
- 24 Terry, R. E. et al.: "Manual for Tracer Test Design and Evaluation", Tertiary Oil Recovery Project, Institute of Mineral Resources Research, University of Kansas, Lawrence May, 1981.