



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

24.124

**MODELO MATEMATICO DEL MOVIMIENTO DE UN
CONTAMINANTE CONSERVATIVO EN UN MEDIO
POROSO, ISOTROPO Y HOMOGENEO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

HECTOR F. PACHECO GUTIERREZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

		Página
Resumen		1
CAPITULO I	GENERALIDADES DE LA CONTAMINACION DE ACUIFEROS.	
1.1	Introducción.	3
1.2	Definición de Contaminante Conservativo.	13
1.3	Características y Propiedades de Algunos Contaminantes Conservativos .	14
1.4	Casos Históricos de Contaminación de Acuíferos por Contaminación Conservativos.	23
CAPITULO II	ANALISIS MATEMATICO DE VOLUMEN.	
2.1	Ecuación de Balance de Masa	32
2.2	Coefficientes de Dispersión y Difusión Molecular.	39
CAPITULO III	SOLUCION DE LA ECUACION DIFERENCIAL PARCIAL.	
3.1	Solución.	60
3.2	Ejemplo Numérico.	70
3.3	Problema de Aplicación.	75
CAPITULO IV	DISCUSION DE LA ECUACION DE APLICACION.	
4.1	Recomendaciones Para su Empleo Práctico en Problemas Reales de Contaminación.	79
CAPITULO V	CONCLUSIONES.	83
	Lista de referencias y bibliografía	86
	Anexo I (Programa)	88
	Anexo II (Tablas, Figuras y Gráficas)	89

R E S U M E N

En el presente trabajo se mencionan las probables causas de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas. Se describen las características y propiedades más importantes de algunos contaminantes conservativos.

Por medio de hipótesis se establece la ecuación diferencial parcial básica que describe un sistema de dispersión con advección de un contaminante conservativo en un medio poroso, isótropo y homogéneo para un régimen de flujo establecido unidireccional y se proporciona un método analítico basado en la transformada de Laplace para llegar a la solución, constituyéndose el Modelo Matemático del Movimiento de un Contaminante Conservativo en un Medio Poroso, Isótropo y Homogéneo.

También se presentan ejemplos numéricos de solución, así como un problema de aplicación para resolverse mediante un programa de computadora.

1.1 INTRODUCCION.

1.1.1 EL MEDIO AMBIENTE HUMANO.

De acuerdo con el aspecto físico que tiene la naturaleza, la materia puede descomponerse en tres estados: sólido, líquido y gaseoso, de los cuales para nuestro estudio tomamos como sólidos, al suelo, mezcla de varios elementos; líquido, al agua, compuesto de dos elementos conocidos y gaseoso, al aire, mezcla de varios gases (nitrógeno, oxígeno y gases raros).

La contaminación del ambiente originada por las actividades de un asentamiento humano puede dividirse por su importancia en dos partes: La primera parte comprende la producción inevitable de desechos biológicos debido a las necesidades físicas y fisiológicas del hombre produciendo aguas negras dentro del ciclo hidrológico; estos desechos no pueden evitarse sin reducir el número de habitantes.

La segunda parte podrá ser la acumulación de desechos industriales que se producen como un resultado de la actividad

tecnológica del hombre y depende de la producción de artículos y materias elaboradas y en menor medida del número de habitantes.

Estas dos partes contribuyen a la contaminación del medio ambiente humano cuyos componentes son: el agua, el aire y el suelo, los cuales son susceptibles de contaminarse por cualquier elemento o sustancia que degrade su condición natural, y al existir una fuerte interrelación entre los componentes y si se elimina algún contaminante en uno de estos, dicho elemento puede afectar a los otros estados físicos del medio ambiente.

Las figuras 1.1.1 y 1.1.2 muestran algunas de las interacciones de contaminantes que se presentan entre aire-suelo y agua-suelo respectivamente.

De los estados físicos que constituyen el medio ambiente los más estudiados hasta ahora en lo que se refiere a procesos de contaminación han sido el aire y el agua, y poco se ha escrito de un medio poroso como es el suelo

1.1.2 IMPORTANCIA DEL SUELO.

1) El suelo constituye una riqueza fundamental para el desarrollo de la agricultura, ganadería y silvicultura, por lo que su capacidad para producir recursos vitales y renovables, debe ser restaurada, mantenida o mejorada.

2) Debido a las condiciones orográficas de nuestro país no es posible incrementar en un alto porcentaje las superficies cultivables, y ésta es una razón suficiente para conservar los suelos libres de contaminación.

3) Por efectos de la contaminación del suelo, el agua subterránea puede verse afectada en su calidad física, química y biológica, por lo que es necesario conservar este recurso libre de toda posible contaminación, ya que es bien sabido que además de la escasez de recursos hidráulicos en nuestro país, las aguas subterráneas representan una de las mayores fuentes de captación de agua para diversos usos. Las aguas subterráneas forman parte del ciclo hidrológico y éstas resultan de la

absorción de la humedad de la superficie de la tierra, por conductos ramificados, como son las grietas, y de la recarga natural o artificial (véase fig. 1.1.3).

1.1.3 PROBABLES CAUSAS DE CONTAMINACION DE AGUAS SUBTERRANEAS.

a) Desechos sólidos domésticos.

Las basuras no utilizables son descargadas al ambiente, - acumulándose sin ningún control sobre la superficie del suelo - en determinados lugares, creando así un tiradero a cielo abierto. Estos desechos aunque son manejados en forma sólida, con - tienen generalmente altos contenidos de agua, la que se infiltra al suelo por la acción de la gravedad, arrastrando una gran cantidad de impurezas que son incorporadas a los acuíferos.* También son incorporadas impurezas al presentarse lluvias sobre estos tiraderos.

* Acuífero - Manto de agua subterránea.

Una forma de disminuir un poco lo anterior, además de proteger el ambiente atmosférico y evitar la proliferación de insectos y roedores, es el efectuar rellenos sanitarios para disponer los desechos sólidos (seleccionados y después de haberse realizado un estudio del suelo y subsuelo) en el suelo.

El agua contenida en un basurero superficial o en un relleno sanitario se mueve en su interior y llega a producir un líquido percolado, el cual es una solución que contiene materia sólida disuelta o suspendida y varios productos microbianos del desecho, ya que varios estudios han mostrado que un gramo de basura doméstica cruda, puede contener 10^6 ó más coliformes fecales y estreptococos fecales, además proporciona abrigo a salmonellas, virus entéricos y hongos patógenos.

La composición del líquido percolado es importante para determinar su efecto potencial sobre la calidad del agua subterránea. La tabla 1.1.1 muestra la composición inicial de un líquido percolado.

b) Desechos animales.

La creciente necesidad de alimento para el hombre ha provocado el confinamiento de muchos animales en pequeños espacios, incrementándose el problema de la eliminación de sus desechos. Los contaminantes predominantes en los desechos animales son los nitratos, los fosfatos y en general los compuestos biológicos, los que disminuyen su potencial contaminante a poca distancia de su lugar de origen debido a la alta degradabilidad a que son sujetos. Por otra parte se ha encontrado que bacterias y virus pueden recorrer distancias mayores de 250m.

Una gran parte de los desechos fecales de los animales, se utilizan frecuentemente como fertilizantes y debido al efecto de las lluvias y el riego, éstos y todos los fertilizantes en general pueden penetrar en el subsuelo y contaminar después los acuíferos.

Los fosfatos se mueven muy lentamente a través del subsuelo y pueden desaparecer por completo a consecuencia de que son adsorbidos o reaccionan químicamente con los materiales del subsuelo.

La forma de controlar este tipo de contaminación es recu
briendo adecuadamente el piso de las zonas en que se confine a
los animales y el tratar las aguas residuales que se produzcan.

c) Filtración de aguas superficiales contaminadas.

Se ha encontrado que las lagunas de estabilización y los
tanques sépticos pueden representar una fuente de contamina- -
ción para los acuíferos. Este problema crece cuando se tienen
pozos de extracción de agua relativamente cercanos de estos pro
cesos.

Para evitar lo anterior se recubre el fondo de las es- -
tructuras de estabilización con algún material filtrante que -
obstruya el paso de los contaminantes ó ubicarlas sobre forma-
ciones geológicas que impidan la infiltración. No obstante lo
anterior se presentan infiltraciones de agua contaminada sobre
todo durante los primeros meses de operación, cuando no se for
ma una capa suficiente de material inerte en el fondo que impi
da el paso del agua residual.

Es importante anotar también que muchas plantas de tra -

tamiento de aguas que utilicen o no reactivos químicos en sus procesos, producen lodos, los que son dispuestos en lechos de secado donde sí se presentan problemas graves de infiltración, ya que las concentraciones de los elementos contaminantes son elevadas.

d) Filtración de aguas salinas.

La sobre explotación de acuíferos cercanos a las zonas costeras, provoca una diferencial de presión hidrostática entre el cuerpo de agua marina y los acuíferos; contaminándose bastante estos últimos debido a la penetración de agua salada proveniente del mar.

Los métodos prácticos y efectivos descubiertos hasta ahora para contrarrestar esta forma de contaminación, es mediante la recarga o inyección de agua dulce a los acuíferos ó por medio de extracción de grandes cantidades de agua salada contaminada para establecer una presión hidrostática negativa que permita al agua dulce ocupar el lugar que deja el agua salobre.

e) Plaguicidas.

Los plaguicidas son todos los elementos que se utilizan para inhibir el crecimiento de organismos que afectan el desarrollo de los cultivos.

Estos elementos generalmente son tóxicos los cuales son esparcidos sobre terrenos de siembra de donde pueden ser - - transportados a las aguas subterráneas o superficiales adyacentes mediante un lavado de tierras, aguas de irrigación y - por escurrimiento de aguas de lluvia.

La eliminación de este problema es muy complejo y difícil como veremos más adelante.

f) Actividades Industriales.

A causa de la creciente actividad industrial desarrollada por el hombre, los desechos producidos por ésta, representan también una gran variedad de formas de contaminación.

Es posible simplificar la clasificación de elementos - contaminantes con fines de análisis en: desechos con alto - contenido de materia orgánica, materia degradable y materia -

tóxica.

Lo anterior se debe a que un gran número de industrias - vierten sus residuos líquidos sin tratamiento previo en los sistemas de alcantarillado urbano, por falta de un reglamento efectivo; Posteriormente estas aguas deben recibir un tratamiento primario para disminuir las concentraciones de contaminantes, - luego ser descargadas directamente al ambiente ó ser utilizadas para riego. En cualquier caso, si las aguas residuales industriales contienen altas concentraciones de elementos tóxicos, - estos inhibirán la reproducción de los microorganismos encargados de la estabilización de las materias degradables provocando con ello un peligro potencial mayor de contaminación de las - - aguas subterráneas, ya que la velocidad por dispersión de un - contaminante a través del suelo es directamente proporcional a su concentración, consecuentemente el menor tiempo de transporte hacia los acuíferos impediría posiblemente su degradación.

La velocidad de flujo de un contaminante en un medio poroso está afectada por los siguientes factores: Concentración del contaminante, porosidad del suelo y solubilidad y condicio

nes físico-químicas del mismo contaminante. Como se ve de lo anterior, el único factor que se puede variar notablemente es la concentración, por lo que la dilución del desecho juega un papel importante para aminorar la contaminación.

Otras formas de descarga de los desechos líquidos industriales son: En pozos de absorción, en las lagunas de infiltración y evaporación y descargas directas en corrientes naturales o en el mar.

1.2 CONTAMINANTE CONSERVATIVO.

1.2.1 DEFINICION DE CONTAMINACION.

Es un término general que significa la inclusión en el medio ambiente de microorganismos o sustancias químicas o radioactivas ó de ondas sonoras, nocivas al hombre y en general a los seres vivos.

1.2.2 DEFINICION DE CONTAMINANTE CONSERVATIVO.

Es aquel elemento que provoca efectos nocivos al hombre y a las interrelaciones con éste, que carece de biodegradabilidad y decaimiento en el tiempo, esto es, que conserva sus propiedades físicas y químicas.

Puede decirse que básicamente los contaminantes conservativos son los metales pesados, los cloruros y los plaguicidas, ya que estos últimos tienen un decaimiento tan lento que prácticamente pueden considerarse conservativos.

1.3 CARACTERISTICA Y PROPIEDAD DE ALGUNOS CONTAMINANTES CONSERVATIVOS.

1.3.1 METALES PESADOS.

De los 103 elementos hasta ahora conocidos, 83 son metales; 68 de ellos tienen una densidad cinco veces mayor que la del agua y son conocidos como metales pesados e incluyen a todos los metales con números atómicos mayores que 23, excepto el rubidio, estroncio, itrio, cesio, bario y francio.

Se encuentran en la naturaleza formando parte de la cor-

teza terrestre, pudiendo encontrarse en el agua en estado soluble o suspendido, constituyendo una forma de contaminación difícil de eliminar de los ecosistemas debido a que son compuestos estables no susceptibles a los mecanismos de oxidación, - precipitación u otro proceso natural. Los metales pesados son de gran importancia en estudios de calidad del agua debido a su toxicidad, llegando a anularse la utilización de los acuíferos por su presencia. Normalmente, estos elementos participan como catalizadores de reacciones bioquímicas en los procesos fisiológicos; pero, en altas concentraciones, puede afectar a la salud del hombre. La toxicidad de los metales pesados está asociada con sus siguientes propiedades físico-químicas: estado de oxidación, solubilidad en el agua y componentes biológicos y con la estabilidad de sus moléculas. Se describen a continuación los metales pesados de mayor importancia.

1.3.1.1 PLOMO (Pb).

Se encuentra en la naturaleza en forma de carbonato y sulfuro de plomo, se presenta en concentraciones trazas en las

aguas naturales.

Es un metal blando y pesado, todas sus sales son venenosas, producen una enfermedad llamada "Saturnismo", se trata de una intoxicación crónica por ingestión de plomo. Las partículas absorbidas se alojan en el organismo y se acumulan, llegando a ser verdaderamente peligroso.

El extenso uso del plomo como aditivo en la gasolina y su consecuente emisión a la atmósfera en los gases de combustión ha incrementado la cantidad disponible de este elemento para su solución en las aguas superficiales y para su disposición en el suelo por efecto de las lluvias.

1.3.1.2 COBRE (Cu).

Se presenta muy raramente en agua dulce superficial; - en dosis relativamente altas, es tóxico y dá al agua un sabor es

pecial.

Se encuentra libre y combinado en la naturaleza, formando numerosos compuestos. En la mayoría de las aguas subterráneas, sólo se detectan trazas de cobre, únicamente en aguas provenientes de minas ó aquellas en contacto con minerales, contienen altas concentraciones de cobre. Este metal es esencial en la formación de la hemoglobina aunque no forma parte de ella, también entra en la composición de enzimas.

1.3.1.3 CROMO (Cr).

No existe libre en la naturaleza, su presencia en las aguas subterráneas está asociada normalmente a la contaminación industrial. El cromo puede presentarse en varios estados de oxidación; de estos el trivalente (+3) y el hexavalente (+6) son estables en agua. Las sales de cromo trivalente son poco tóxicas, sin embargo las de cromo hexavalente (cromatos y dicromatos) son fuertemente venenosas.

1.3.1.4 ARSENICO (As).

Se encuentra libre en la naturaleza como un sólido de color gris acero, quebradizo; también se encuentra combinado en forma de diversos minerales. Es muy raro encontrar este elemento en las aguas superficiales o subterráneas, teniendo un origen natural, generalmente su presencia se debe a contaminación industrial, a explotación minera ó a contaminación por plaguicidas.

1.3.1.5 FIERRO (Fe).

No se encuentra libre en la naturaleza, sino formando compuestos minerales en casi todos los suelos. Las sales de hierro se encuentran disueltas principalmente como bicarbonato ferroso y no son tóxicas en pequeñas cantidades, le comunican al agua un sabor astringente. Es un constituyente normal del organismo, ya que forma parte de la hemoglobina.

1.3.1.6 MANGANESO (Mn).

Este elemento es un veneno cuando se ingiere en grandes dosis, que afecta al sistema nervioso, no se encuentra libre en la naturaleza sino formando varios tipos de minerales como óxidos y sulfuros. Se encuentra normalmente en el organismo humano ya que es un activador de ciertas enzimas. No es normal su presencia en las aguas naturales; sólo en casos excepcionales - en aguas ácidas, generalmente asociado al fierro y en el caso de una contaminación industrial.

1.3.1.7 MERCURIO (Hg).

Es el único metal que existe en fase líquida a temperatura ambiente. Muy pocas aguas naturales contienen trazas de mercurio, generalmente su presencia se debe a actividades de la minería, metalurgia y a desechos industriales.

Una buena parte del mercurio se encuentra en el suelo, - proviene del aire que a su vez ha sido contaminado por sales de

mercurio para fines agrícolas e industriales.

Las tablas 1.3.1 y 1.3.2 muestran respectivamente las concentraciones máximas permisibles para ciertos metales pesados, según las normas mexicanas, y los efectos tóxicos que causan la ingestión de algunos metales pesados.

1.3.2 PLAGUICIDAS.

Definición propuesta por la Comisión Panamericana de Normas Técnicas:

"Se entiende por plaguicida, cualquier sustancia o mezcla de sustancias que se destinan a combatir, destruir, controlar, prevenir, atenuar o repeler la acción de cualquier forma de vida animal, vegetal, insecto, roedor, nemátodo, hongo, mala hierba, etc., que afecte la salud y bienestar del hombre, animal ó planta útiles. Por extensión, se incluyen también las sustancias o mezcla de sustancia que se usen para regular el crecimiento de las plantas, defoliantes, desecantes."

Dentro de las sustancias plaguicidas nos encontramos con productos de muy distinta composición química, predominando enormemente los compuestos orgánicos sobre los inorgánicos. Al diferir ampliamente las propiedades de los plaguicidas, es variable también su potencial como contaminantes del medio. El efecto tóxico de los residuos de plaguicidas, depende fundamentalmente de la toxicidad específica de plaguicida, la cual se mide por las Dosis Letales 50, DL50 aguda, que es un estimador estadístico de la concentración del plaguicida en agua, suficiente para matar al 50% de los organismos de la prueba en un tiempo determinado y bajo condiciones estándar.

La contaminación por plaguicida puede ser transmitida al cuerpo humano en forma oral, dérmica y por inhalación.

Los plaguicidas pueden clasificarse de acuerdo a la definición por el uso a que estén destinados, como son los insecticidas, acaricidas, fungicidas, rodenticidas y los nematocidas.

La tabla 1.3.3 muestra una clasificación detallada de los

plaguicidas.

Los de mayor uso de plaguicidas han sido los insecticidas, ya que éstos se desarrollaron primero. En la actualidad existen en el mercado productos que tienen sustancias activas contra insectos, ácaros y hongos al mismo tiempo.

Aunque la aplicación de plaguicidas, agrícolas y domésticos es dirigida al suelo, se crean aerosoles incontrolables que son arrastrados y depositados por los vientos y otras condiciones climáticas sobre terrenos y aguas superficiales adyacentes. Los residuos de plaguicidas sobre el suelo pueden ser transportados a través de este medio hacia aguas subterráneas, ya sea por medio de un lavado, por agua de irrigación o por el escurrimiento del agua de la lluvia. Los plaguicidas son altamente volátiles y se transfieren del suelo al aire mediante evaporación, de donde regresan eventualmente al suelo ó a los cuerpos de agua acompañando al ciclo hidrológico. La persistencia de algunos plaguicidas más importantes en el suelo, se muestran en la tabla 1.3.4.

1.3.3. CLORUROS.

El cloro aunque es un componente menor de la corteza terrestre, se encuentra disuelto en forma de ión cloruro en la mayor parte de las aguas naturales, dependiendo su concentración de la calidad de los suelos drenados.

Todos los cloruros encontrados en las aguas naturales son altamente solubles, por lo que no es posible eliminarlos por precipitación, asimismo, está relativamente fuera de la influencia de los efectos de la filtración, absorción, actividad biológica y de las reacciones de óxido reducción, de tal manera que es difícil de eliminarlos por procesos naturales.

1.4 CASOS HISTORICOS DE CONTAMINACION POR CONTAMINANTES - CONSERVATIVOS.

1.4.1 METALES PESADOS.

El 16 de Agosto de 1962, la Unidad Sanitaria de Torreón, Coah., recibió el reporte de una comisión de vecinos de las Co

lonias Miguel Alemán y Eduardo Guerra, quienes denunciaban un brote epidémico grave; se reportaron 40 casos de enfermos y una defunción, y según decían, lo anterior se debía al mal estado del agua que bebían.

Las colonias antes mencionadas, se encuentran aledañas a una Compañía metalúrgica que tiene 60 años de establecida en el lugar y procesa 350 000 ton de minerales ricos en plomo, azufre, arsénico, cadmio, selenio y talio al mes; sus procesos industriales arrojan al aire toneladas de óxidos metálicos de las sustancias señaladas. Esta Industria produce arsénico-sublimado y cadmio metal los que se manejan al aire libre; sus sistemas de manejo de aguas están formadas por lagunetas, pozos de absorción, estanques y canales no impermeables, y posiblemente el arsénico ha sido arrastrado a más de 120m de profundidad, contaminando los acuíferos de los pozos circunvecinos; el pozo de la Colonia Miguel Alemán fué clausurado después de haberse encontrado una concentración de 3.9 mg/l de arsénico.

La contaminación afecta también al ejido Finisterre en el Municipio de Francisco I. Madero localizado a 67 Km. por carre

tora al noroeste de Torreón, donde autoridades sanitarias se seleccionaron al azar a 35 personas mayores de 16 años, las que fueron estudiadas clínicamente. Durante tres días seguidos, cuatro nutricionistas se encargaron de cuantificar la ingestión de alimentos y agua a las personas en estudio, lo mismo que de recolectar la orina y materia fecal cada 24 horas.

Se analizaron las muestras y se encontró que las concentraciones de arsénico en el agua bebida variaron de 0.63 a 0.95 mg/l., con un promedio de 0.78 mg/l. La ingestión de este metal fué de 0.85 a 1.72 mg en 24 horas, lo que dependió directamente de la cantidad de agua ingerida.

La excreción de arsénico varió de persona a persona, así como de día a día en una misma persona. La retención de arsénico en el cuerpo humano, fué muy importante, de un 68% al 96% de la cantidad ingerida, lo que representó una cantidad diaria retenida de 0.65 a 1.45 mg. De lo anterior, se deduce que la principal fuente de contaminación del arsénico fué el agua subterránea y por la distancia entre los focos de contaminación se supone una contaminación natural.

Otro caso, es el ocurrido en la zona de Lechería, Estado de México, aquí se suscitó una contaminación del ambiente por efecto de los polvos, desechos líquidos y sólidos, emitidos al aire, agua y suelo, por una industria que produce 11.7 ton. de cromato de sodio ($\text{Na}_2 \text{Cr}_2 \text{O}_7$) y 1.04 ton. de cromato de potasio al día.

Los efectos tóxicos de los gases, afectaron a los 128 trabajadores que prestaban sus servicios a la industria. Los compuestos de cromo depositados en el suelo, fueron arrastrados por el agua de lluvia y se infiltraron al acuífero del que se capta el agua para abastecer a la zona; por efecto del movimiento del agua subterránea también se contaminó un pozo distante a 800m - el que tuvo que ser clausurado por sobreparasar las normas mexicanas para la prevención y control de la contaminación de aguas.

1.4.2. PLAGUICIDAS.

En el ciclo agrícola de 1974 en México, se tuvo conocimiento de 847 casos de intoxicación por plaguicidas entre personas dedicadas principalmente a las labores agrícolas y a la fumiga -

ción en la Comarca Lagunera.

La Comarca Lagunera está situada al Norte de la República Mexicana; comprende seis municipios del Suroeste del Estado de Coahuila y siete del Estado de Durango. Cuenta con 700,130 habitantes, de los cuales el 74% residen en la zona urbana y el 26% restante en la zona rural, repartidos en: cinco centros de población urbana, tres suburbanos y 914 comunidades rurales.

De los 847 casos por plaguicidas, se tuvo noticia que fallecieron cuatro personas, resultando una tasa de morbilidad general de 121 X 100,000 habitantes y de letalidad de 0.47% del total de casos.

La tasa de morbilidad y de mortalidad están calculadas en relación a la población total.

La mayor parte de las incidencias quedaron comprendidas entre la segunda mitad del mes de Junio y la primera de Agosto, presentándose el primer caso de intoxicación a principios de Mayo y finales de Septiembre. El rango de edad más afectado fue-

el de 15 a 24 años de edad, le siguió el de 25 a 34 años, siendo las personas mayores de 35 años los menos afectados.

El 92.5% de los casos se presentó por inhalación, el 5% por ingestión y el 2.5% por contacto. Los casos más graves -- fueron ocasionados por ingestión y contacto.

Los casos leves presentaron varios síntomas y las personas no duraron hospitalizadas más de un día. Las personas en estado grave duraron hospitalizadas más de 24 horas y menos de 72 horas, las muy graves fueron hospitalizadas más de 72 horas.

Los insecticidas que originaron el problema fueron los siguientes:

Azodrin	8.9%
Gusation	2.3%
Lannate	6.6%
Meldrin	37.8%
Paration	16.5%
Sevin	11.0%

Los demás organo-
fosforados.

14.8%

Generalmente, cuando se aplica cualquier plaguicida, origina una cierta cantidad de contaminación ambiental, tal como ha sucedido con la aplicación del D.D.T.

En 1956, la zona palúdica de la República Mexicana comprendía una superficie de cerca de 10^6 Km²; aproximadamente de 1957 a 1965 se efectuaron cada seis meses rociados intradomiciliarios de D.D.T. sobre las paredes, desde el nivel del piso, hasta 2.50m de altura y también en las superficies expuestas de los muebles. Después de las primeras aplicaciones de D.D.T. los insectos desaparecieron; posteriormente al segundo rociado, el 70% de los niños en edad escolar primaria presentaron conjuntivitis rebelde a tratamiento. A principios de 1958 los insectos habían formado defensas contra el insecticida y también habían aumentado de tamaño; la producción de la leche de vaca disminuyó notablemente y un porcentaje elevado de vacas abortaron o parieron seres teratológicos. La enterocolitis en la población infantil aumentó y mejoraron los enfermos al su -

primírseles la leche de vaca, además de que se presentaron anemias marcadas e ictericias intra-hepáticas en campesinos.

En las aves, la vacuna contra el New-Castle fué inefectiva.

En 1959, se reportaron los primeros 12 casos de anemia - por insuficiencia medular.

En 1960, la zona palúdica había rebasado los 10^6 Km² de superficie.

CAPITULO II

ANALISIS MATEMATICO DEL MODELO

2.1. ECUACION DE BALANCE DE MASA.

Para hallar un modelo matemático que defina la distribución de un contaminante en un medio dado, es necesario conocer las ecuaciones de balance y transferencia del contaminante en determinado medio.

Nos auxiliaremos de la fig. 2.1.1, para explicar lo anterior, donde se muestra un cubo elemental y su diagrama de definiciones. Efectuaremos en este cubo elemental un balance de masa, el cual estará definido por el sistema:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Masa que} \\ \text{entra} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Masa que} \\ \text{sale} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Acumulación} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Carga ó extracción} \\ (+) \quad \quad (-) \end{array} \right] \dots(2.11)$$

Las expresiones "carga o extracción" nos indican el aumento o disminución de la cantidad del contaminante en el sistema. Esto puede ser debido a causas naturales o por modificaciones artificiales hechas por el hombre como: almacenamientos, consumos, descargas, etc.

La desorción, solución, intercambio iónico y la oxida -

ción de un contaminante por otro, son ejemplos de cargas. Una extracción puede presentarse por precipitación química, adsorción ó intercambio iónico.

Nuestro balance de masa, tomará en cuenta la convección, la dispersión, la difusión molecular y además establecerá como extracción el valor de la adsorción.

Los términos de la relación 2.1.1 se describirán para un flujo bidimensional paralelo a los ejes "x", "y" y estarán en función de las siguientes variables que intervienen en el fenómeno:

C: Concentración del contaminante en fase líquida.

t: Tiempo.

n: Porosidad del acuífero.

q: Concentración del contaminante en fase sólida.

μ : Velocidad de transporte de la solución en el sentido de las "X" (abscisa).

ν : Velocidad de transporte de la solución en el sentido de las "Y" (ordenada).

k : Coeficiente del decaimiento del contaminante.

Ex: Coeficiente de dispersión en el sentido de las "x"

Ey: Coeficiente de dispersión en el sentido de las "y"

Dm: Coeficiente de difusión molecular.

Existen varios criterios para describir la adsorción; es decir, la transferencia de masa del contaminante de la fase líquida "C" hacia la fase sólida 'q' del medio poroso. Funcionalmente, este fenómeno se puede expresar como una diferencial parcial con respecto al tiempo:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = f(c, q)$$

Un criterio sencillo es el considerar un equilibrio-- entre la transferencia de masa de la fase líquida a la sólida-- que puede expresarse de la siguiente manera:

$$q = C \cdot k_1 \quad \dots (2.1.2.)$$

k_1 : Coeficiente de distribución de concentración entre las fases líquida y sólida.

Por tanto la adsorción queda:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k_1 \frac{\partial c}{\partial t} \quad \dots (2.1.3.)$$

Otras relaciones para expresar la transferencia de masa en la interfase son las siguientes:

a) Transferencia en desequilibrio.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = K_1 C - K_2 q$$

b) Transferencia de langmuir.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = K_1 C (q_0 - C) - K_2 q$$

c) Transferencia de Freundlich.

$$q = K_1 C^n \quad ; \quad 0.1 \leq n \leq 1.0$$

Las relaciones anteriores no serán utilizadas ya que sólo son válidas para ciertos casos, además de que su utilización es complicada para el análisis matemático.

Refiriéndonos a la fig. 2.1.1, tenemos que la masa que entra, menos la que sale a través de los planos $dydz$ y $dx dz$, - esto es, en las direcciones "x", "y", será igual a:

$$\left[QC + ndydz \left(-Ex \frac{\partial C}{\partial x} \right) + ndydz \left(-Dm \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] dx -$$

$$\left[QC + ndydz \left(-Ex \frac{\partial C}{\partial x} \right) + ndydz \left(-Dm \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \right.$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} \left[QC + ndydz \left(-Ex \frac{\partial C}{\partial x} \right) + ndydz \left(-Dm \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] \right] dx$$

$$\begin{aligned}
& + \left[QC + n dx dz \left(-E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + n dx dz \left(-D_m \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] dy \\
& - \left[QC + n dx dz \left(-E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + n dx dz \left(-D_m \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \right. \\
& \left. \frac{\partial}{\partial y} \left[QC + n dx dz \left(-E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + n dx dz \left(-D_m \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \right] dy \quad \dots (2.1.4)
\end{aligned}$$

Realizando operaciones, obtenemos que la masa que entra menos la que sale es:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial x} \left[QC + n dy dz \left(-E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + n dy dz \left(-D_m \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] dx \\
& \frac{\partial}{\partial y} \left[QC + n dx dz \left(-E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + n dx dz \left(-D_m \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] dy \quad \dots (2.1.5).
\end{aligned}$$

El valor de la acumulación más las cargas ó extracciones, estará dado por las variaciones con respecto al tiempo de las concentraciones del contaminante en fase líquida y sólida, -mas el decaimiento en ambas fases, esto se expresa a continuación:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \left[n dx dy dz C + (1-n) dx dy dz q \right] + n dx dy dz KC + dx dy dz k (1-n) q \\
& \dots (2.1.6).
\end{aligned}$$

Hacemos notar que los vacíos en el medio poroso serán ocupados por un "n" porcentaje de la fase líquida y el complemento de la fase sólida.

Por otra parte, la velocidad de la solución en un sentido, en el de las "x" se obtiene por continuidad:

$$u = \frac{Q}{n \frac{dydz}{dx}} \dots (2.1.7)$$

Para el caso del eje de las "y", será:

$$v = \frac{Q}{n \frac{dx dz}{dy}} \dots (2.1.8)$$

De acuerdo con la expresión (2.1.1), igualamos (2.1.5) con (2.1.6), dividimos el sistema entre "n dx dy dz" y sustituimos - en este las ecuaciones (2.1.7) y (2.1.8), quedando ahora como sigue:

$$-u \frac{\partial C}{\partial x} + E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial y} + E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$$

$$+ Dm \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1-n}{n} \frac{\partial q}{\partial t} + kC + \frac{(1-n)}{n} Kq \quad \dots (2.1.9)$$

Ordenando esta última expresión, se obtiene la ecuación general del comportamiento de un contaminante no conservativo que se trasfiere de la fase líquida a la sólida en dos dimensiones (x, y).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1-n}{n} \frac{\partial q}{\partial t} + \mu \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + kC + \frac{1-n}{n} Kq =$$

$$Ex \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + Ey \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + Dm \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + Dm \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad \dots (2.1.10)$$

Finalmente, si de la ecuación general (2.1.10) particularizamos una sola dimensión, englobamos en una sola constante "D" los coeficientes de dispersión hidrodinámica y difusión molecular, además despreciamos los efectos de la adsorción debido al corto tiempo de su duración y si consideramos nuestro caso particular de contaminante conservativo, el decaimiento vale cero ($k=0$), llegaremos a la conocida ecuación diferencial básica que describe un sistema de dispersión con advección en un medio poroso, isótropo y homogéneo para un campo de flujo -

establecido, unidireccional en un sentido "x", o en una dirección paralela al flujo, como se muestra en la fig. 2.1.2.

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad \dots (2.1.11)$$

Los dos primeros términos de (2.1.11) representan el transporte del contaminante debido a la dispersión y a la advección respectivamente. El miembro de la derecha indica el almacenamiento desoluto en la región ocupada por la solución (fase líquida).

2.2. COEFICIENTES DE DISPERSION Y DIFUSION MOLECULAR.

2.2.1 Coeficiente de difusión molecular.

La difusión de una sustancia en solución es el proceso por el cual los constituyentes iónicos ó moleculares se mueven bajo la influencia de su actividad cinética en la dirección de su gradiente de concentración. La difusión ocurre en ausencia de cualquier movimiento de la solución. Si la solución -

fluye, la difusión es acompañada de dispersión mecánica, que causa un mezclado de los constituyentes iónicos o moleculares. La difusión cesa únicamente cuando deja de existir un gradiente de concentración.

La masa de sustancia que pasa a través de una sección dada por unidad de tiempo, es proporcional al gradiente de concentración. Esto también es conocido como la PRIMERA LEY DE FICK, la cual se expresa:

$$F = -D_m \frac{dC}{dx}$$

Donde:

F= Masa de soluto que se difunde en la unidad de área por la unidad de tiempo $[M/L^2T]$

D_m = Coeficiente de difusión molecular $[M/L^3]$

$\frac{dC}{dx}$ = Gradiente de concentración.

El signo negativo nos indica que la difusión ocurre en la dirección donde hay un déficit de concentración. Los va

lores de los coeficientes de difusión dependen de la temperatura. Por ejemplo a 5°C, los coeficientes son un 50% menores -- aproximadamente que a 25°C, como lo podemos ver en las tablas-- 2.2.1.1 y 2.2.1.2 en las cuales se muestran los coeficientes de difusión para algunos iones de metales pesados a diferentes temperaturas; y los coeficientes de algunas sustancias a 20°C respectivamente.

De la primera Ley de Fick y de la ecuación de continuidad es posible derivar una ecuación diferencial que relacione la concentración de una sustancia en difusión con el espacio y el tiempo. En una dimensión esta ecuación es conocida como la SEGUNDA LEY DE FICK y está definida como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Para obtener un índice de la velocidad a la que el soluto puede difundirse en un medio poroso, se ha supuesto una situación donde dos estratos saturados con agua, los que contienen diferentes concentraciones de soluto, están en contacto y -- que su gradiente hidráulico es despreciable. Para un tiempo --

inicial común, uno de los estratos contiene sustancias "i" como soluto en concentración "Co", y en el otro estrato la concentración inicial "C" es muy pequeña y puede tomarse como ce ro.

Debido al gradiente de concentración, a través de la interfase, el soluto se difundirá desde el estrato de la concentración más baja. También se ha supuesto que la concentración de soluto en el estrato de mayor concentración permanecerá constante con el tiempo por efecto de una "carga" como podría ser el caso de una dilución mineral del estrato que mantuviera en equilibrio su concentración.

Para las condiciones anteriores, varias investigaciones han determinado la expresión siguiente que define la concentración del soluto en función de la distancia y el tiempo:

$$C_i(x, t) = C_o \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad \dots (2.2.1.1)$$

Donde:

C_o = Es la referencia de concentración o concentración traza.

erfc = Complemento de la función error; el cual está definido por la relación siguiente:

$$\text{erfc } x = 1 - \text{erf } x$$

y "erf" está definido por la integral:

$$\text{erf } x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

En la cual "y" es una variable de integración y "x" es un número positivo o negativo.

La función erfc x se calcula empleando las series siguientes:

Para los valores de la distancia de la difusión (x)

$$0 \leq x < 3$$

$$\text{erfc } x = \frac{1}{(1+a_1x+a_2x^2+a_3x^3+a_4x^4+a_5x^5)^8} \quad \dots (2.2.1.2)$$

para valores $x \geq 3$ utilizaremos:

$$\text{erfc } x = \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{2x^3} + \frac{2}{2^2x^5} - \frac{15}{2^3x^7} + \frac{105}{2^4x^9} - \frac{945}{2^5x^{11}} + \frac{10365}{2^6x^{13}} \right)$$

... (2.2.1.3)

Las constantes a_i tienen los valores siguientes:

$$a_1 = 0.14112821$$

$$a_2 = 0.08864027$$

$$a_3 = 0.002743349$$

$$a_4 = -0.00039446$$

$$a_5 = 0.00328975.$$

En la tabla 2.2.1.3 encontraremos diferentes valores de x^* y sus correspondientes valores de "erfc".

Ejemplo de aplicación para la ecuación (2.2.1.1).

Supongamos un valor para la difusión molecular de un contaminante de: $D_m = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{seg.}$ Se desea conocer el tiempo que tardará en presentarse la centésima parte de la concentración inicial del contaminante a una distancia de $d=10\text{m}$, es decir se dá la relación de concentración relativa de:

$$C/C_0 = 0.01.$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación -- (2.2.1.1) tenemos:

$$0.01 = \operatorname{erfc} \frac{10}{2\sqrt{5 \times 10^{-10} t}} \quad \dots (a)$$

Consultando la tabla (2.2.1.3) obtendremos el argumento del complemento del error función de 0.01, el cual resultó de:

$$1.8290$$

Igualando este valor con el argumento del miembro derecho de la expresión (a), se tiene:

$$1.8290 = \left(\frac{10}{2\sqrt{5 \times 10^{-10} t}} \right)$$

Se despeja a "t" y efectuamos operaciones:

$$t = \frac{\left(\frac{5}{1.829} \right)^2}{5 \times 10^{-10}} = 1.49466 \times 10^{10} \text{ seg.}$$

$$t = 473.95 \text{ años.}$$

El tiempo que tardará en difundirse hasta una distancia de 10 metros, la centésima parte de la concentración inicial de un contaminante será de 473.95 años.

De lo anterior se observa que la difusión es un proce-

so muy lento. En zonas de flujo subterráneo considerable, estos efectos están normalmente involucrados en el transporte ad vectivo del soluto.

La figura 2.2.1.1 muestra las distancias de difusión para períodos de 100 y 10,000 años en función de su concentración relativa. Estas distancias fueron obtenidas mediante la función (2.2.1.1) y valores para el coeficiente de difusión de 1×10^{-10} y 1×10^{-11} m²/seg., los cuales son representativos de un intervalo típico de sustancias químicas conservativas en depósitos geológicos arcillosos.

2.2.2. Coeficiente de dispersión.

El proceso mediante el cual los solutos son transferidos con la misma velocidad y dirección con que se mueve el agua subterránea que los transporta, se conoce como advección. Existe también una tendencia por parte del soluto a difundirse fuera de la trayectoria del agua; este fenómeno de propalamientos conocido como dispersión hidrodinámica ó dispersión mecánica y es debida a las variaciones de velocidad del fluido y también a la difusión molecular provocada por la energía térmica.

ca-cinética de las partículas del soluto. Se enfatiza que la dispersión es originada enteramente por el movimiento del fluído a diferencia de la difusión molecular, la que es un proceso de importancia solamente a muy bajas velocidades.

En una escala microcópica, la dispersión es causada - por tres mecanismos: El primero ocurre en los tubos capilares- debido a la viscosidad del fluído que ocasiona una velocidad - nula en las fronteras, creando así un gradiente de velocidad en una sección de dichos tubos capilares. El segundo es causado por las variaciones de las dimensiones de los poros que propi- cian discrepancias entre las velocidades a lo largo de los ejes de los poros. El tercer mecanismo de dispersión está relacio- nado con la tortuosidad, ramificaciones e interferencia de los tubos capilares que hacen que las líneas de corrientes fluc- - túen con respecto a la dirección media del flujo.

La propagación del soluto en la dirección del flujo es conocida como dispersión longitudinal, y la propagación en di- rección perpendicular al flujo es llamada dispersión transver- sal. La dispersión longitudinal es normalmente mucho más gran

de que la dispersión transversal.

Puede definirse a la dispersión longitudinal como el proceso por el cual algunas de las moléculas del agua y del soluto viajan más rápidamente que la velocidad lineal promedio de la solución y otras viajan más lentamente, lo que provoca que el soluto se difunda fuera de la dirección del flujo y disminuya en concentración.

La dispersión depende de:

- a) Las viscosidades (μ) y las densidades (ρ) de ambos fluidos; el agua de saturación y la solución del contaminante.
- b) La aceleración de la gravedad (g).
- c) La velocidad promedio en el poro (U).
- d) El coeficiente de difusión molecular (D_m).
- e) La permeabilidad, diámetro promedio del grano, etc. ($k, d, -$ etc.).

Para efectuar el análisis dimensional del fenómeno de la dispersión utilizando las variables antes descritas, se hacen las siguientes consideraciones:

- 1) El mezclado ocurre sin disminución de volúmen; la diferencia de las densidades debido a la acción de la gravedad puede expresarse mediante un sólo parámetro.

$$g (\rho - \rho_0) = g \Delta \rho$$

ρ = Densidad de la solución del contaminante.

ρ_0 = Densidad del agua pura.

- 2) Coeficiente de la difusión molecular D_m , se supone independiente de la concentración.
- 3) La dispersión depende solamente de las viscosidades de ambos fluidos antes de su mezclado.

Por lo anterior la dispersión estará en función de los parámetros:

$$D = f(g \Delta \rho, \mu_1, \mu_2, U, D_m, k)$$

Aplicando el teorema π ó de Vaschy-Buchinham se dice que existe una relación funcional de "m" cantidades dimensionales que pueden expresarse en términos de (m-n) grupos adimensionales donde "n" es el número de dimensiones fundamentales

que intervienen en el fenómeno (tres en nuestro caso). Se puede establecer entonces una segunda función de siete parámetros:

$$\varphi(D, g \Delta \rho, \mu_1, \mu_2, U, D_m, k)$$

Por lo que tenemos 7 cantidades adimensionales y tres dimensiones fundamentales y por lo tanto:

$$m-n = 7-3 = 4 \text{ parámetros adimensionales.}$$

2.2.2.1 Análisis Dimensional.

Tomamos como variables independientes: $g \Delta \rho, D, k$; y como variables dependientes a D_m, U, μ_1, μ_2 .

Hacemos la tabla 2.2.2.1 para efectuar el análisis. -
Ahora tomando las variables independientes con cada una de las variables dependientes.

$$\pi_1 = (g \Delta \rho)^{a_1} D^{b_1} k^{c_1} D_m$$

$$F^0 L^0 T^0 = [F L^{-3}]^{a_1} [L^2 T^{-1}]^{b_1} [L T^{-1}]^{c_1} [L^2 T^{-1}]$$

Realizando igualdades:

$$F^\circ; 0 = a_1$$

$$L^\circ; 0 = -3a_1 + 2b_1 + c_1 + 2$$

$$T^\circ; 0 = -b_1 - c_1 - 1$$

De las ecuaciones anteriores tendremos:

$$2b_1 + c_1 = -2$$

$$(+)$$

$$\frac{-b_1 - c_1 = 1}{b_1 = -1 \quad \therefore \quad c_1 = 0}$$

De lo anterior:

$$a_1 = 0 ; \quad b_1 = -1 ; \quad c_1 = 0 \quad \dots (2)$$

Sustituyendo los valores de (2) en (1):

$$\pi_1 = \frac{Dm}{D} \quad \text{por ser adimensional, podemos escribirlo -}$$

tambi3n:

$$\pi_1 = \frac{D}{Dm}$$

$$\pi_2 = (g \Delta Q)^{a_2} D^{b_2} k^{c_2} U \quad \dots (3)$$

$$F^\circ L^\circ T^\circ = [FL^{-3}]^{a_2} [L^2 T^{-1}]^{b_2} [LT^{-1}]^{c_2} [LT^{-1}]$$

Utilizando la tabla 2.2.2.1

$$F^{\circ}; \quad 0=a_2$$

$$L^{\circ}; \quad 0=-3a_2+2b_2+c_2+1$$

$$T^{\circ}; \quad 0=-b_2-c_2-1$$

Nos queda:

$$(-) \quad \frac{\begin{array}{l} 2b_2+c_2=-1 \\ b_2+c_2=-1 \end{array}}{b_2=0} \quad \therefore c_2 = -1$$

De lo anterior:

$$a_2=0 ; \quad b_2=0 ; \quad c_2=1 \quad \dots (4)$$

Sustituyendo los valores de (4) en (3)

$$\pi_2 = \frac{U}{k}$$

Pero sabemos que la permeabilidad es:

$$k = \frac{Dm}{d}$$

Donde, "d" es el diámetro de la partícula.

Por lo cual tendremos:

$$\pi_2 = \frac{U_d}{D_m}$$

Número de Peclet.

$$\pi_3 = (g\Delta\rho)^{a_3} D^{b_3} k^{c_3} u_1 \quad \dots (5)$$

$$F^\circ L^\circ T^\circ = [FL^{-3}]^{a_3} [L^2 T^{-1}]^{b_3} [LT^{-1}]^{c_3} [FL^{-2} T]$$

$$F^\circ; \quad 0 = a_3 + 1$$

Por lo que $a_3 = -1$

$$L^\circ; \quad 0 = -3a_3 + 2b_3 + c_3 - 2$$

$$T^\circ; \quad 0 = -b_3 - c_3 + 1$$

Lo anterior queda:

$$\begin{array}{r} 2b_3 + c_3 = -1 \\ (+) \quad -b_3 + c_3 = -1 \\ \hline b_3 = -2 \end{array}$$

De lo anterior:

$$a_3 = -1; \quad b_3 = -2; \quad c_3 = 3 \quad \dots (6)$$

Sustituyendo (6) en (5)

$$\pi_3 = \frac{k^3 u_1}{(g\Delta\rho) D^2}$$

$$\pi_4 = (g\Delta R) a_4 D^{b_4} k^{c_4} u_2 \quad \dots (7)$$

$$F^\circ L^\circ T^\circ = [FL^{-3}] a_4 [L^2 T^{-1}] b_4 [LT^{-1}] c_4 [FL^{-2} T]$$

$$F^\circ; \quad 0 = a_4 + 1 \quad \text{Por lo que } a_4 = -1$$

$$L^\circ; \quad 0 = -3a_4 + 2b_4 + c_4 - 2$$

$$T^\circ; \quad 0 = -b_4 - c_4 + 1$$

Lo anterior nos quedará:

$$\begin{array}{r} 2b_4 + c_4 = -1 \\ (+) \quad -b_4 - c_4 = -1 \\ \hline b_4 = -2 \end{array}$$

De lo anterior

$$a_4 = -1 ; \quad b_4 = -2 ; \quad c_4 = 3 \quad \dots (8)$$

Sustituyendo (8) en (7):

$$\pi_4 = \frac{k^3 \mu_2}{(g\Delta R) D^2}$$

De los números adimensionales $\bar{\pi}_i$ obtenidos, se observa que $\bar{\pi}_3/\bar{\pi}_4 = \mu_1/\mu_2 = 1$ pues la diferencia de viscosidades entre el agua de saturación y la solución del contaminante es mínima.

Varios investigadores han encontrado que el número de Peclet y la relación D/D_m son los parámetros adimensionales más importantes del fenómeno de la dispersión. En un laboratorio, los experimentos con trazadores en materiales granulares homogéneos saturados, han establecido las relaciones de ambos parámetros, determinándose con esto la influencia de la dispersión y la difusión molecular tal como se muestra en la figura 2.2.2.1 en la cual pueden distinguirse las siguientes tres zonas, donde hacemos notar, para cada una lo siguiente:

I.- La difusión molecular es más significativa que la dispersión. En este caso:

$$D/D_m = 0.67 \quad \dots (2.2.2.5)$$

II.- Esta es una zona de transición en la cual la dispersión y

la difusión molecular son significativas.

$$D = D_m \dots (2.2.2.6)$$

III.- Aquí la dispersión es mucho más significativa que la difusión molecular. En este caso:

$$D/D_m = a_0 \left(\frac{Ud}{D_m} \right)^m \quad (2.2.2.7)$$

Donde m es la pendiente de la curva. La línea punteada corresponde al valor $m = 1$. En este caso la ecuación (2.2.2.7) se convierte a:

$$D = a_0 Ud \quad (2.2.2.8)$$

Donde a_0 es un número adimensional cuyo valor es aproximadamente 1.9.

El coeficiente de dispersión puede determinarse en función del coeficiente de difusión molecular empleando la figura 2.2.2.1, como podremos ver en el ejemplo que a continuación se muestra.

Supongamos que tenemos una velocidad intersticial promedio de $= 16.7\text{m/día} = 1.93 \times 10^{-4} \text{ m/seg}$. Un promedio del diámetro efectivo de las partículas del medio de $d = 1.0\text{mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$ y que se trata de la solución de amoníaco (NH_3) en agua a una temperatura de 20°C .

Entramos a la tabla 2.2.1.2 y tenemos que $D_m = 1.76 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{seg}$. con lo cual podemos calcular el número de Peclet.

$$\frac{Ud}{D_m} = \frac{(1.93 \times 10^{-4}) (10^{-3})}{(1.76 \times 10^{-9})}$$

$$\frac{Ud}{D_m} = 1.10 \times 10^2$$

Tomando este valor y entrando con éste a la figura 2.2.2.1 encontramos que nuestro régimen de flujo está en la zona - III, además se observa que nuestra pendiente es $m = 1$ por lo que emplearemos la expresión (2.2.2.8) para calcular el valor de la dispersión, por lo que:

$$D = a_0 U d = (1.9) (1.93 \times 10^{-4}) (10^{-3}) = 3.67 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}.$$

$$D = 3.67 \times 10^{-3} \frac{\text{cm}^2}{\text{seg.}} = 0.032 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

CAPITULO III

SOLUCION DE LA ECUACION DIFERENCIAL
PARCIAL

3.1. SOLUCION ANALITICA.

En el capítulo anterior, inciso 2.1., se obtuvo la ecuación diferencial parcial (2.1.11):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial c}{\partial x} \quad \dots (3.1.1)$$

Esta ecuación describe un sistema de dispersión con - advección de un contaminante en un medio poroso, isótropo y homogéneo para un campo de flujo establecido unidireccional.

Para resolver la ecuación (3.1.1) se empleará la transformada de Laplace. Este método permite reducir una ecuación diferencial parcial en función de "t" y "x" a una ecuación diferencial parcial ordinaria en función de "x" únicamente; contiene una variable transformada $\bar{c}(x)$ en lugar de una variable dependiente $c(t,x)$ y que puede resolverse por métodos conocidos. El resultado es una ecuación explícita para \bar{c} como función de x y otros parámetros constantes. Luego, para convertir la solución \bar{c} en una función explícita de "t" y "x", se aplica la transformada inversa de Laplace a la solución.

De la ecuación (3.1.1) tenemos:

D : Coeficiente de dispersión.

C : Concentración del soluto en el fluido.

U : Velocidad promedio del fluido.

t : Tiempo

x : Coordenada paralela al tiempo.

El modelo (3.1.1) considera que inicialmente en el medio poroso saturado existe un flujo a una concentración $C=0$ en un tiempo $t=0$ y la concentración en un plano origen $x=0$, cambia y se mantiene a $C=C_0$. De acuerdo con lo anterior, las condiciones apropiadas de frontera son:

$$C(0,t) = C_0 \quad ; \quad t > 0 \quad \dots (3.1.2)$$

$$C(x,0) = 0 \quad ; \quad x > 0 \quad \dots (3.1.3)$$

$$C(\infty,t) = 0 \quad ; \quad t > 0 \quad \dots (3.1.4)$$

Arreglando la expresión (3.1.1)

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad \dots (3.1.5)$$

Multiplicando los términos de (3.1.5) por (e^{-st}) e integrando con respecto a "t" en el intervalo $(0, \infty)$ obtenemos:

$$D \int_0^{\infty} e^{-pt} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} dt - U \int_0^{\infty} e^{-pt} \frac{\partial c}{\partial x} dt - \int_0^{\infty} e^{-pt} \frac{\partial c}{\partial t} dt = 0 \dots (3.1.6)$$

Intercambiando las disposiciones de las diferenciales e integrales por separado de cada uno de los miembros, tenemos:

$$\int_0^{\infty} e^{-pt} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} dt = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^{\infty} c e^{-pt} dt \dots (3.1.7)$$

Por definición de la transformada de Laplace " \mathcal{L} " de una función $f(t)$, se tiene:

$$\mathcal{L} \{ f(t) \} = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt \dots (3.1.8)$$

Por lo que:

$$\mathcal{L} \{ c \} = \bar{c} = \int_0^{\infty} c e^{-pt} dt \dots (3.1.9)$$

Sustituyendo (3.1.9) en el miembro derecho de (3.1.7)

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^{\infty} c e^{-pt} dt = \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} \quad \dots (3.1.10)$$

De la misma forma anterior, hacemos lo mismo para el siguiente término de (3.1.6) se tiene:

$$\int_0^{\infty} e^{-pt} \frac{\partial c}{\partial x} dt = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\infty} c e^{-pt} dt = \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \quad (3.1.11)$$

Procediendo similarmente con el tercer término faltante de (3.1.6) se tiene:

$$\int_0^{\infty} e^{-pt} \frac{\partial c}{\partial t} dt \quad \dots (3.1.12)$$

Esta integral se resolverá por partes, considerando:

$$\begin{aligned} u &= e^{-pt} & ; & & du &= -pe^{-pt} \\ dv &= dc & ; & & v &= c \end{aligned}$$

Sustituyendo en (3.1.12):

$$\int_0^{\infty} e^{-pt} \frac{\partial c}{\partial t} dt = \left[c e^{-pt} \right]_0^{\infty} + p \int_0^{\infty} c e^{-pt} dt = p\bar{c} \quad (3.1.13)$$

La expresión (3.1.13) se obtuvo aplicando la condición de frontera (3.1.3), esto es, $C=0$ cuando $t=0$, además $t=\infty$ el mismo término desaparece.

Sustituyendo (3.1.10), (3.1.11) y (3.1.13) en (3.1.6):

$$D \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - U \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - p \bar{C} = 0 \quad \dots (3.1.14)$$

A continuación se aplicará la condición de frontera (3.1.2) a la definición de transformada de Laplace, la que nos dice que la concentración en el plano origen ($x=0$) es siempre C_0 .

$$\bar{C} = \int_0^{\infty} C e^{-pt} dt \quad ; \quad C = C_0 \quad ; \quad x=0$$

$$\bar{C} = C_0 \int_0^{\infty} e^{-pt} dt$$

pero sabemos que:

$$\int_0^{\infty} e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} e^{-pt} (1) dt = \mathcal{L}\{1\} = \frac{1}{p}$$

$$\therefore \bar{C} = \frac{C_0}{p} \quad (\text{para } x = 0) \quad \dots (3.1.15)$$

De todo lo anterior, observamos que las transformadas de Laplace reducen la ecuación diferencial parcial (3.1.1) a una ecuación ordinaria semejante a la ecuación (3.1.14). Esto es (3.1.1) puede escribirse como:

$$D \frac{d^2 \bar{C}}{dx^2} - U \frac{d\bar{C}}{dx} - P\bar{C} = 0 \quad \dots (3.1.16)$$

Para hallar la solución particular de la ecuación diferencial anterior se aplicará la condición de que $C = 0$ cuando $x = \infty$

La ecuación auxiliar de (3.1.16) es:

$$D q^2 - Uq - p=0$$

Donde:

$$q_1 = \frac{U + (U^2 + 4 PD)^{1/2}}{2D}$$

$$q_2 = \frac{U - (U^2 + 4PD)^{1/2}}{2D}$$

Por lo que la solución general será:

$$\bar{c} = A \exp \left[\frac{U + (U^2 + 4PD)^{1/2}}{2D} (x) \right] + B \exp \left[\frac{U - (U^2 + 4PD)^{1/2}}{2D} (x) \right] \quad \dots (3.1.17)$$

Para encontrar la solución particular se aplicarán - las condiciones antes mencionadas:

a) $\bar{c} = 0$; $x = \infty$

Con lo cual (3.1.15) se transforma a:

$$0 = A (\infty) + B (0) \quad \dots (3.1.18)$$

Para que (3.1.18) se cumpla, $\Rightarrow A = 0$.

Por lo anterior (3.1.17) se reduce a:

$$\bar{c} = B \exp \left[\frac{U - (U^2 + 4PD)^{1/2}}{2D} (x) \right] \quad \dots (3.1.19)$$

b) De la ecuación (3.1.15) sabemos que $\bar{c} = \frac{C_0}{p}$ para $x=0$, por lo - que con esta condición la ecuación (3.1.19) se reduce a:

$$\frac{C_0}{p} = B (1) \quad \dots (3.1.20)$$

Que sustituido en (3.1.19) nuevamente, tendremos la so lución particular:

$$\bar{c} = \frac{c_0}{p} \exp \left[\frac{U - (U^2 + 4pD)^{1/2}}{2D} (x) \right] \dots (3.1.21)$$

Efectuando operaciones y separando términos:

$$\bar{c} = \frac{c_0}{p} \exp\left(\frac{Ux}{2D}\right) \exp \left[-\frac{x}{2D} (U^2 + 4pD)^{1/2} \right]$$

$$\bar{c} = c_0 \exp\left(\frac{Ux}{2D}\right) \frac{1}{p} \exp \left[-\frac{x}{D^{1/2}} \left(\frac{U^2 + 4pD}{4D}\right)^{1/2} \right]$$

$$\bar{c} = c_0 \exp\left(\frac{Ux}{2D}\right) \frac{1}{p} \exp \left[-\frac{x}{D^{1/2}} \left(\frac{U^2}{4D} + p\right)^{1/2} \right] \dots (3.1.22)$$

Ahora, de la expresión (3.1.22) se efectuará su transformada inversa por medio del método de Laplace para llegar a la solución particular final.

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{x-Ut}{2(Dt)^{1/2}} \right] + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{Ux}{D}\right) \operatorname{erfc} \left[\frac{x+Ut}{2(Dt)^{1/2}} \right]$$

... (3.1.23)

La ecuación anterior puede escribirse en términos de - parámetros adimensionales haciendo:

$$\eta = \frac{Ut}{x}$$

y:

$$\eta = \frac{D}{Ux}$$

Con lo cual (2.3.23) puede escribirse como:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{1 - \xi}{2 \sqrt{\xi \eta}} \right) + \exp \left(\frac{1}{\eta} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{1 + \xi}{2 \sqrt{\xi \eta}} \right) \right]$$

...(3.1.24)

Esta relación es conocida como ecuación del comportamiento de un sistema de dispersión longitudinal con advección de un contaminante conservativo en un medio poroso, isótropo y homogéneo para un flujo establecido. Donde:

C : Concentración del soluto en fase líquida.

C_0 : Concentración de referencia.

C/c_0 : Concentración relativa.

erfc : representa el complemento de la función error, al que presentamos a partir de la ecuación- - (2.1.1.1)

x : Distancia a lo largo de la trayectoria del fluido

U : Promedio de la velocidad lineal del fluido o velo
cidad superficial del medio poroso.

t : Tiempo.

3.2. EJEMPLO NUMERICO

Se presenta a continuación un ejemplo aplicando la ecuación (3.1.23) con los datos siguientes:

$$\frac{C}{C_0} = 0.5 \quad (\text{Concentración relativa})$$

$$x = 10 \text{ m} \quad (\text{distancia})$$

$$U = 2 \times 10^{-6} \text{ m/s} \quad (\text{vel. promedio del fluido})$$

$$D = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{Coeficiente de dispersión}).$$

En este problema, se desea conocer el tiempo "t" que tardará en presentarse un medio de la concentración inicial a una distancia de 10 metros.

Solución:

Para facilitar la solución de este problema, se realizarán aproximaciones con distintos valores de "t", por lo que, la ecuación (3.1.23) se escribirá como sigue:

Si establecemos la siguiente igualdad :

aproximación hasta horas si se desea, repitiendo la misma operación.

Para el caso particular que tenemos, (3.2.3) la escribiremos como:

$$1 - \operatorname{erfc} \frac{x - Ut}{2(Dt)^{1/2}} - 4.84 \times 10^8 \operatorname{erfc} \frac{x + Ut}{2(Dt)^{1/2}} = 0$$

.... (3.2.4)

En la hoja siguiente, se muestra una tabla de los cálculos realizados para encontrar el resultado, pudiendo hacerse también para llegar al mismo, con una calculadora de escritorio que sea programable.

Los valores de la función $\operatorname{erfc} x$ se calcularon con las relaciones (2.2.1.2) ó (2.2.1.3) de acuerdo al argumento x , utilizando las constantes "ai" descritas en el capítulo anterior.

El resultado final es donde la diferencia $Z_1 - Z_2$ se aproxima más a cero, en este caso tenemos a:

$$t = 4'762,800 \text{ seg.} = 55.12 \text{ días.}$$

Como resultado final.

t (seg)	$\frac{x-Ut}{2(Dt)^{1/2}}$	erfc	$Z_1=1-\text{erfc}$	$\frac{x+Ut}{2(Dt)^{1/2}}$	erfc	$Z_2=4.85 \times 10^8$ $\times \text{erfc}$	$Z_1 - Z_2$
864 000	4.44962	1.421×10^{-9}	1.00000	6.30865	2.930×10^{-18}	1.421×10^{-9}	1.00000
1 296 000	3.25363	1.425×10^{-5}	0.99999	5.53047	2.938×10^{-14}	1.425×10^{-5}	0.99998
1 728 000	2.48909	0.00141	0.99859	5.11816	4.548×10^{-13}	2.206×10^{-4}	0.99837
2 160 000	1.93237	0.01320	0.98680	4.87176	5.591×10^{-12}	0.00300	0.98380
2 592 000	1.49568	0.05256	0.94744	4.71561	2.578×10^{-11}	0.01300	0.93444
3 024 000	1.13630	0.13391	0.86609	4.61424	6.776×10^{-11}	0.03300	0.83309
3 456 000	0.83053	0.26350	0.73650	4.54860	1.254×10^{-10}	0.06100	0.67550
3 888 000	0.56395	0.43865	0.56135	4.50755	1.834×10^{-10}	0.08900	0.47235
4 320 000	0.32716	0.64780	0.35220	4.48408	2.276×10^{-10}	0.11000	0.24220
4 752 000	0.11376	0.87243	0.12757	4.47358	2.506×10^{-10}	0.12200	0.00557
5 184 000	-0.08081	1.09099	-0.09099	4.47286	2.523×10^{-10}	0.12200	-0.21299
4 838 400	0.07346	0.91731	0.08269	4.47273	2.526×10^{-10}	0.12300	-0.04031
4 755 000	0.11207	0.87430	0.12570	4.47354	2.508×10^{-10}	0.12200	0.00370
4 759 200	0.11037	0.87618	0.12382	4.47350	2.508×10^{-10}	0.12200	0.00182
4 762 800	0.10868	0.87806	0.12194	4.47346	2.509×10^{-10}	0.12169	0.00025
4 766 400	0.10699	0.87993	0.12007	4.47342	2.510×10^{-10}	0.12174	-0.00167

3.3. PROBLEMA DE APLICACION

3.3.1. Descripción del problema.

Se tiene una excavación especial para depósito de materiales, como se muestra en la figura 3.3.1., el cual contiene un contaminante conservativo, cromo hexavalente (Cr^{+6}). Por efecto de un mal drenado, se produce un líquido percolado, el cual se infiltra al subsuelo a una velocidad de 2×10^{-6} m/seg. con una concentración inicial de $C_1 = 5$ mg/l del citado metal. El diámetro efectivo de las partículas del medio es de $1.0 \text{ mm} - 1 \times 10^{-3} \text{ m}$, y el nivel freático se encuentra a 10 metros bajo la superficie. Como sabemos, las normas mexicanas establecen un valor permisible de 0.05 mg/l en el agua, cuando esta se utiliza como fuente de abastecimiento para sistemas de agua potable con tratamiento convencional (mezcla rápida, coagulación, sedimentación, filtración y desinfección).

Nos interesa determinar:

- a) El tiempo en el cual este valor máximo establecido se detectará en el nivel freático.
- b) El espesor ó distancia de la interfase para que este mismo -

valor máximo establecido se presente a los quince días - -
(1'296,000 seg.)

3.3.2 Solución.

Considerando los datos obtenidos en la descripción del problema, utilizaremos las tablas 2.2.1.1. y la figura 2.2.2.1, se procede igualmente que en el ejemplo descrito en el inciso 2.2.2 del capítulo dos, se encuentra el coeficiente de dispersión del cromo, en función de su coeficiente de difusión molecular, y se obtiene un valor aproximado y para fines de ejemplo de $D = 1 \times 10^{-6}$ m²/seg.

Se elabora un programa de computadora en lenguaje BASIC para llegar a resultados rápidos, basado en las relaciones - - (3.1.2.3), (2.2.1.2) y (2.2.1.3), el cual se muestra en el - - anexo I, y observamos los resultados después de varios incrementos para los incisos a y b.

3.3.3 Resultados

a) El tiempo de recorrido de la concentración del contaminante

es: $T = 2'206,800 \text{ seg} = 25.54 \text{ días.}$

b) La distancia de recorrido de la concentración del contaminante

te en 15 días es de 6.8m.

El programa es susceptible de emplearse, cuando en un -
flujo horizontal se tengan problemas de movimiento de un contaminante
desde una carga hasta una extracción.

CAPITULO IV

DISCUSION DE LA ECUACION DE APLICACION

4. DISCUSION DE LA ECUCACION DE APLICACION.

Se hace notar que en el presente trabajo se ha desarro llado un modelo matemático que representa el movimiento de un- contaminante conservativo en un sistema de dispersión con con- vección en un medio poroso, isótropo y homogéneo para un campo de flujo establecido unidireccional en el eje "X", o en una di rección paralela (ecc. 3.1.23 y fig. 2.1.2).

4.1. Recomendaciones para el empleo práctico del modelo en problemas reales de contaminación.

1. Por lo difícil de su determinación en el laboratorio, - es aconsejable obtener el coeficiente de dispersión de una sus tancia o un ión, en función de su coeficiente de difusión mole cular, a partir de las relaciones que guardan los parámetros - adimensionales del número de Peclet $\left(\frac{Ud}{D_m}\right)$ y de $\left(\frac{D}{D_m}\right)$.

2. Emplear la ecuación de aplicación que describe un sistema de dispersión con convección, no sólo en un flujo descendente, sino en cualquier dirección paralela al flujo, como - ejemplo: Cuando en un flujo horizontal se tengan problemas de movimiento de un contaminante desde una carga hasta una extracción.

3. El número de Peclet $\frac{Ud}{D_m}$, y el cociente $\frac{D}{D_m}$ son - los parámetros adimensionales más importantes del fenómeno de la dispersión. Las relaciones que guardan estos parámetros - definen la influencia de la dispersión hidrodinámica y la difusión molecular en el fenómeno de la dispersión por lo que deben determinarse lo más exacto posible.

4. Se deben diseñar gráficas para su empleo en problemas reales de contaminación, como ayudas de diseño. Como ejemplo para la tabla (2.2.1.3) se han diseñado las gráficas (4.1) y (4.2).

5. Para la ecuación (3.1.24) también se pueden construir diagramas de ayuda para la comprensión del comportamiento de las variables que intervienen en el movimiento del contaminante conservativo ya descrito. (gráfica 4.3.).

6. Para la aplicación del programa presentado en el capítulo anterior se harán las siguientes indicaciones para su empleo práctico en problemas reales.

El programa ha sido elaborado en lenguaje "BASIC" para ser aplicado en el sistema HP-9830. Se trata de un mini-computador y la razón de utilizarlo es que existe la tendencia a usar estos equipos de ayuda.

Instrucciones

El programa puede ser traducido a otro lenguaje y aplicado para otro tipo de máquina. Este equipo tiene una pantalla, en la instrucción 70 se nos pide proporcionar un número, - el 1 si deseamos determinar el tiempo que tarda la concentración inicial de un contaminante en recorrer una distancia en base a los datos dados en una instrucción anterior, la 60, si este es el caso, se pasará posteriormente a la instrucción 120 y ejecutará los demás pasos; si proporcionamos el número 2, - significa que deseamos determinar la distancia de recorrido de acuerdo a los datos antes proporcionados y ejecutará las instrucciones a partir del paso 870. Para los dos casos, el programa sigue las instrucciones similarmente a los descritos en el ejemplo numérico (punto 3.2). El programa tiene la versatilidad de calcular, sin interrupción y sin necesidad de correr nuevamente el programa, los dos casos descritos anteriormente - como se hizo en el problema de aplicación. (punto 3.3).

CAPITULO V

CONCLUSIONES

C O N C L U S I O N E S

- 1.- Existe una fuerte interrelación entre los componentes del ambiente físico: agua, aire y suelo, de tal manera que se debe tener especial cuidado al eliminar un contaminante fuera de cualquier medio, ya que pueden afectarse mutuamente.
- 2.- El agua subterránea, es una importante fuente de abastecimiento, y puede verse afectada en su calidad física, química y biológica, por lo que es necesario conservar este recurso libre de toda contaminación.
- 3.- Es necesario controlar las descargas de aguas industriales contaminados, ya que como hemos visto, la eliminación de los contaminantes conservativos, como son los metales pesados, es bastante complicada.
- 4.- En general es necesario reglamentar todo tipo de descarga de contaminantes y equipos de protección (fumigación) y vigilar el cumplimiento de las disposiciones.

- 5.- El movimiento de un contaminante por su difusión molecular es un proceso muy lento (ejemplo de la aplicación ecuación 2.2.11).
- 6.- La dispersión hidrodinámica es un fenómeno causado enteramente por el movimiento del fluido, a diferencia de la difusión molecular, y se trata de un proceso de importancia solamente a muy bajas velocidades en el flujo.
- 7.- La velocidad de flujo de un contaminante en un medio poroso está en función de su concentración, por lo que es recomendable diluir los desechos tóxicos antes de su descarga al suelo.
- 8.- Es muy importante considerar todas las variables que intervengan en un fenómeno para poder desarrollar un modelo matemático que sea representativo, así como el estudio de las interrelaciones que existan dentro de dicho fenómeno.

B I B L I O G R A F I A

1. Ogata, A. y Bank, R.B. "A Solution of the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media" - U.S. Geological Survey Profesional Papel 411-A. Washington 1961.
2. Rich, L.G. "Operaciones Unitarias de Ingeniería Sanitaria" Comp. Edit. Cont., S.A. 1963.
3. Banks, R.B. y Ali, I. "Dispersion and Adsorption in Porous Media Flow" Journal Hydraulics Division, ASCE. - Sept. 1964.
4. Bachmat, Y. y Bear, J. "The General Equations of Hydrodynamic Dispersion in Homogeneous Isotropic, Porous Media." J. Geophys. Res. 69 (12). 1964.
5. Lerman, A. "Geochemical Processes Water and Sediment - Environments".
6. Catalan, L.J. "Química del Agua" Edit. Blume 1969.
7. Waton, W.C. "Groundwater Resource Evaluation" Mc. Graw Hill Book Company 1970.
8. Theodore, L. "Transport Phenomena for Engineers". The International series in Chemical Engineering, 1971.
9. SRH, SSA. "Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas". México, D.F. 1973.
10. Banks, R.B. y Jonguitud V.F. "Mecanismos de Contaminación de Aguas Subterráneas" Instituto de Ingeniería. - U.N.A.M. 1974.

11. Marino, M.A. "Distribution of Contaminants" Water Resources Research. Vol. 10 Oct. 1974.
12. Fried, J.J. "Groundwater Pollution". Elsevier Holanda, 1975.
13. Crank J. "The Mathematics of Diffusion". Oxford University Press 1975.
14. Castagnino, W.A. "Polución de Agua, Modelos y Control". Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, 1976.
15. Sánchez Gómez J. "Estudio Tipo para Prevenir y Controlar la Contaminación de Corrientes de Agua" I.P.N. Tesis Profesional, 1976.
16. Freeze, R.A. y Cherry, J.A. "Groundwater" Prentice Hall Inc. 1979.
17. Vidales Albarrán H. "Contaminación de Acuíferos en el Area Metropolitana" Inst. de Ing. U"N"A"M". 1976.
18. Vidales Albarrán H. y Cobo, E.D. "Impacto de Metales Pesados y Plaguicidas en el Recursos Hidráulico" I. de Ing. U.N.AM.
19. Murray, R.S. "Transformadas de Laplace" Mc. Graw Hill - Book Company, 1978.

ANEXO I
PROGRAMA

```

10 DIM P(4),Q(4)
20 PRINT "PROGRAMA DALIA/TALINA"
30 PRINT "PROGRAMA PARA CALCULAR LA CONCENTRACION DE UN CONTAMINANTE CONSERVA-"
40 PRINT "TIVO , EN UN MEDIO POROSO SATURADO, EN FUNCION DE LA DISTANCIA, VELO-"
50 PRINT "CIDAD, TIEMPO Y LA DISPERSION LONGITUDINAL."
60 READ C,C1,D,U
70 DISP "DAME:1 SI (T); 2 SI (X)";
80 INPUT W
90 IF W=1 THEN 120
100 INPUT T
110 GOTO 150
120 INPUT X
130 PRINT "X: DISTANCIA (MTS)="X
140 GOTO 160
150 PRINT "T: TIEMPO (SEG)="T
160 PRINT "C: CONCENTRACION FINAL (MG/L)="C
170 PRINT "C1: CONCENTRACION INICIAL (MG/L)="C1
180 PRINT "D: COEFICIENTE DE DISPERSION (MT 2/SEG)="D
190 PRINT "U: VELOCIDAD DEL FLUIDO EN EL MEDIO (MT/SEG)="U
200 I=1
210 IF W=2 THEN 270
220 DISP "DAME VALOR INICIAL DE (T)";
230 INPUT T1
240 FOR I=1 TO 4
250 READ P(I)
260 NEXT I
270 PRINT
280 PRINT
290 PRINT
300 PRINT "
310 PRINT
320 PRINT
330 J3=0
340 Z3=2*SQR(D*T1)
350 Z1=(X-U*T1)/Z3
360 Z2=(X+U*T1)/Z3
370 Y8=(2*C/C1)-FNA(Z1)
380 Y9=EXP(U*X/D)*FNA(Z2)
390 IF Y8 >= Y9 THEN 470
400 PRINT "CAMBIO DE SIGNO", "
TIEMPO(SEG)
IGUALDAD"
T1,Y8-Y9

```

```

410 T1=T1-PC[I1]
420 I1=I1+1
430 IF I1>4 THEN 510
440 T1=T1+PC[I1]
450 J3=J3+1
460 GOTO 340
470 PRINT "INCREMENTA: NO HAY IGUALDAD" T1, Y8-Y9
480 T1=T1+PC[I1]
490 J3=J3+1
500 GOTO 340
510 PRINT
520 PRINT
530 PRINT
540 PRINT "EL RESULTADO ES"
550 PRINT "*****"
560 PRINT
570 PRINT
580 PRINT "EL TIEMPO DE RECORRIDO DE LA CONC. (C) DEL CONTAM. ES"; T1; "SEG"
590 PRINT
600 PRINT
610 PRINT "EL NUMERO DE ITERACIONES FUE DE:"; J3
620 PRINT
630 PRINT
640 PRINT "LOS INCREMENTOS (EN SEG.), FUERON:" PC[1]; PC[2]; PC[3]; PC[4]
650 GOTO 1330
660 DEF FNA(Y)
670 IF Y >= 3 THEN 750
680 R1=0.14112821
690 R2=0.08864027
700 R3=0.002743349
710 R4=-0.00039446
720 R5=0.00328975
730 S=1/((1+R1*Y+R2*Y+Y+R3*Y^3+R4*Y^4+R5*Y^5)^8)
740 RETURN S
750 S=0
760 K=-1
770 FOR I=1 TO 7
780 K=K*(2*(I-1)-1)
790 S=S+(K*(-1)^(I+1))/((2^(I-1))*(Y^(2*I-1)))
800 NEXT I

```

```

810 IF ABS(Y) <= 15 THEN 840
820 R6=9.918E+99
830 GOTO 860
840 R6=EXP(-Y+2)
850 S=R6*S/(PI+0.5)
860 RETURN S
870 DISP "DAME VALOR INICIAL DE (X)";
880 INPUT X1
890 FOR I=1 TO 4
900 READ Q[I]
910 NEXT I
920 PRINT
930 PRINT
940 PRINT
950 PRINT "          DIST. (MTS.)          IGUALDAD"
960 PRINT
970 PRINT
980 J3=9
990 Z3=2+SOR(D*T)
1000 Z1=(X1-U*T)/Z3
1010 Z2=(X1+U*T)/Z3
1020 Y8=((2*C/C1)-FNA(Z1))
1030 Y9=EXP(U*X1/D)*FNA(Z2)
1040 IF Y8 <= Y9 THEN 1120
1050 PRINT "CAMBIO DE SIGNO", "          X1,Y8-Y9"
1060 X1=X1-Q[I]
1070 I1=I1+1
1080 IF I1>4 THEN 1160
1090 X1=X1+Q[I]
1100 J3=J3+1
1110 GOTO 990
1120 PRINT "INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD"X1,Y8-Y9
1130 X1=X1+Q[I]
1140 J3=J3+1
1150 GOTO 990
1160 PRINT
1170 PRINT
1180 PRINT
1190 PRINT "          EL RESULTADO ES"
1200 PRINT "          *****"

```

```

1210 PRINT
1220 PRINT
1230 PRINT "LA DIST. DE RECORRIDO DE LA CONC. (C) DEL CONTAM. ES: "; X1; "MTS"
1240 PRINT
1250 PRINT
1260 PRINT "EL NUMERO DE ITERACIONES FUE DE: ", J3
1270 PRINT
1280 PRINT
1290 PRINT "LOS INCREMENTOS (EN MTS.), FUERON: "Q1[1]; Q1[2]; Q1[3]; Q1[4]
1300 GOTO 1330
1310 DATA 0.05, 5.1E-06, 2E-06
1320 DATA 3.59E+06, 432000, 86400, 3600
1330 END

```

PROGRAMA DALIA-TALINA
PROGRAMA PARA CALCULAR LA CONCENTRACION DE UN CONTAMINANTE CONSERVATIVO, EN UN MEDIO POROSO SATURADO, EN FUNCION DE LA DISTANCIA, VELOCIDAD, TIEMPO Y LA DISPERSION LONGITUDINAL.

X: DISTANCIA (MTS)= 10
C: CONCENTRACION FINAL (MG/L)= 0.05
C1: CONCENTRACION INICIAL (MG/L)= 5
D: COEFICIENTE DE DISPERSION (MT²/SEG)= 1.00000E-06
U: VELOCIDAD DEL FLUIDO EN EL MEDIO (MT/SEG)= 2.00000E-06

	TIEMPO(SEG)	IGUALDAD
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	432000	0.02
CAMBIO DE SIGNO	3022000	-0.147282522
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	864000	0.019999999
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	1296000	0.019993265
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	1728000	0.018212607
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2160000	3.39216E-03
CAMBIO DE SIGNO	2592000	-0.046231737

CAMBIO DE SIGNO	2246400	-3.03525E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2163600	3.15384E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2167200	2.91305E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2170800	2.66978E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2174400	2.42402E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2178000	2.17575E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2181600	1.92496E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2185200	1.67164E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2188800	1.41577E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2192400	1.15734E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2196000	8.96336E-04
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2199600	6.32747E-04
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2203200	3.66558E-04
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD	2206800	9.77554E-05
CAMBIO DE SIGNO	2210400	-1.73673E-04

EL RESULTADO ES

EL TIEMPO DE RECORRIDO DE LA CONC. (C) DEL CONTAM. ES 2206800 SEG

EL NUMERO DE ITERACIONES FUE DE: 21

LOS INCREMENTOS (EN SEG.), FUERON: 2590000 432000 86400 3600

PROGRAMA BALIZA/TALINA

PROGRAMA PARA CALCULAR LA CONCENTRACION DE UN CONTAMINANTE CONSERVATIVO, EN UN MEDIO POROSO SATURADO, EN FUNCION DE LA DISTANCIA: VELOCIDAD, TIEMPO Y LA DISPERSION LONGITUDINAL.

T: TIEMPO (SEG)= 1296000
 C: CONCENTRACION FINAL (MG/L)= 0.05
 C1: CONCENTRACION INICIAL (MG/L)= 5
 D: COEFICIENTE DE DISPERSION (MT²/SEG)= 1.00000E-06
 U: VELOCIDAD DEL FLUIDO EN EL MEDIO (MT/SEG)= 2.00000E-06

DIST. (MTS.)	IGUALDAD
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 2	-1.828258182
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 5	-0.195052277
CAMBIO DE SIGNO 8	0.017016430
CAMBIO DE SIGNO 7	3.20421E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 6	-0.048959335
CAMBIO DE SIGNO 7	3.20421E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 6.1	-0.040659791
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 6.2	-0.033211188
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 6.3	-0.026545915
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 6.4	-0.020599300
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 6.5	-0.015309793
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 6.6	-0.010619099
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 6.7	-6.47225E-03
INCREMENTA, NO HAY IGUALDAD 6.8	-2.81767E-03
CAMBIO DE SIGNO 6.9	3.92863E-04

EL RESULTADO ES

LA DIST. DE RECORRIDO DE LA CONC. (C) DEL CONTAM. ES: 6.8 MTS

EL NUMERO DE ITERACIONES FUE DE: 14

LOS INCREMENTOS (EN MTS.), FUERON: 3 2 1 0.1

ANEXO II**TABLAS, FIGURAS Y GRAFICAS.**

COMPONENTE	VALOR BAJO	VALOR ALTO
PH	6.0	6.5
Dureza CaCO ₃	890.0	7,600.0
Alcalinidad CaCO ₃	730.0	9,500.0
Ca	240.0	2,330.0
Mg	64.0	410.0
Na	85.0	1,700.0
K	28.0	1,700.0
Fe (total)	6.5	220.0
Ion ferroso	8.7	8.7
Cloruros	96.0	2,350.0
Sulfatos	84.0	730.0
Fosfatos	0.3	29.0
Nitrógeno orgánico	2.4	465.0
Nitrógeno amoniacal	0.22	480.0
DBO	21,700	30,300.0

Unidades en mg/l excepto el PH.

TABLA 1.1.1. COMPOSICION DE UN LIQUIDO PERCOLADO.

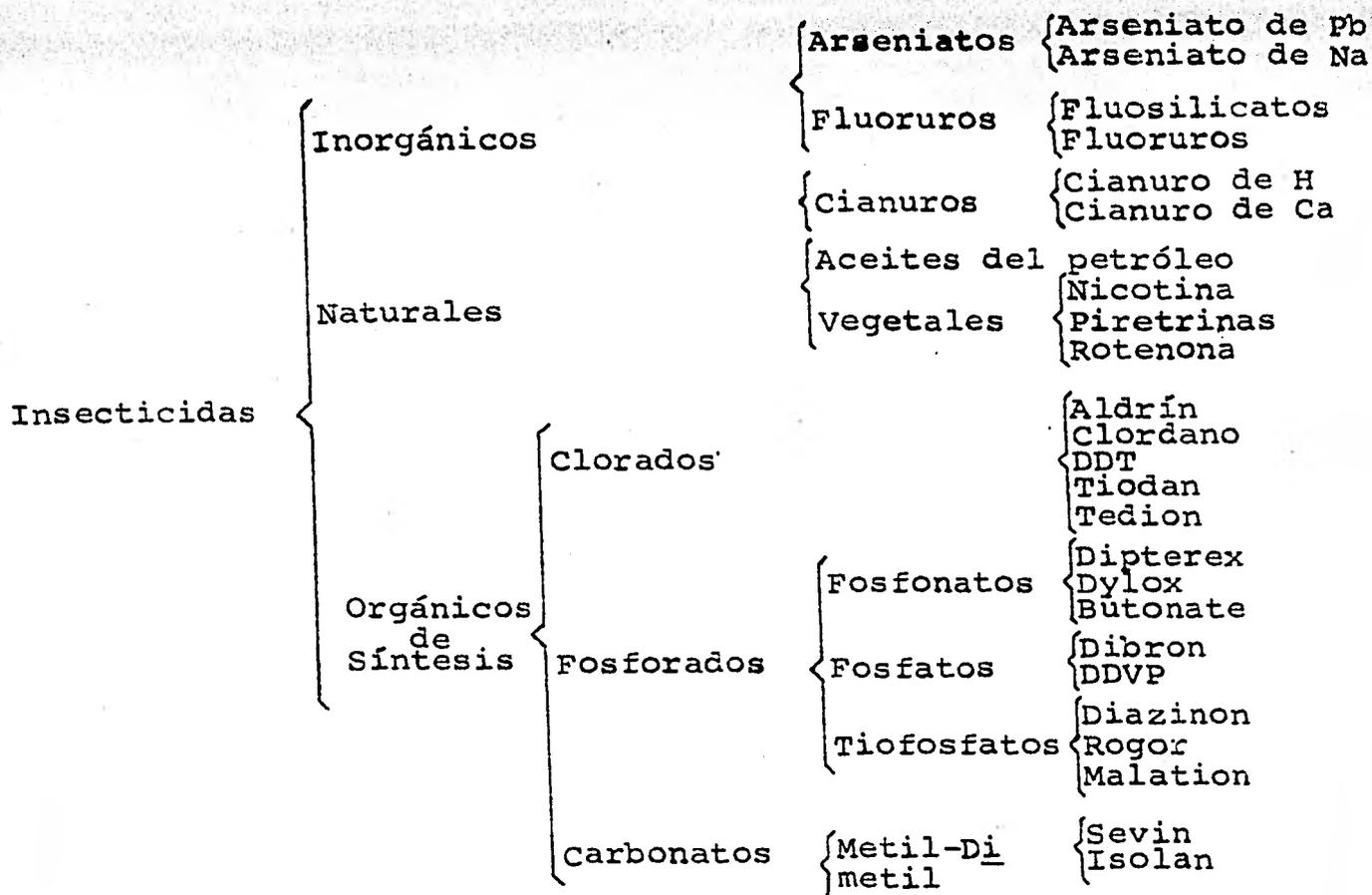
	DA	DI	DII	DIII
Arsénico	0.05	0.05	1.00	5.00
Bario	1.00	1.00	5.00	-
Boro	1.00	1.00	-	2.00
Cadmio	0.01	0.01	0.01	0.005
Cobre	1.00	1.00	0.10	1.00
Cromo hexavalente	0.05	0.05	0.10	5.00
Mercurio	0.005	0.005	0.01	-
Plomo	0.05	0.05	0.10	5.0
Selenio	0.01	0.01	0.05	0.05
Cianuro	0.20	0.20	0.02	-
Fenoles	0.001	0.001	1.00	-

DA	Abastecimiento para sistemas de agua potable e industria alimenticia con desinfección únicamente. Recreación (contacto primario) y libre para los usos DI, DII y DIII.
DI	Abastecimiento de agua potable con tratamiento convencional (coagulación, sedimentación, filtración y desinfección) e industrial.
DII	Agua adecuada para uso recreativo, conservación de flora, fauna y usos industriales.
DIII	Agua para uso agrícola e industrial.

TABLA 1.3.1. CONCENTRACIONES MAXIMAS PERMISIBLES DE SUSTANCIAS TOXICAS EN LOS CUERPOS RECEPTORES.

EFECTOS TOXICOS	S U S T A N C I A S					
	As	Ba	Cd	Cr+6	Pb	Se
Aborto					*	
Anemia	*				*	*
Anorexia				*	*	*
Ansiedad		*				
Anuria				*		
Carcinogenesis	*			*		
Cirrosis hepática	*					
Diarrea	*	*	*		*	*
Disnea		*	*	*		
Dolor abdominal	*		*	*	*	*
Dolor de cabeza			*	*		*
Irritación gastrointestinal			*			*
Lasitud				*		*
Mareo		*	*		*	*
Náusea	*	*	*	*	*	*
Oliguria				*	*	
Palidez					*	*
Salivación	*		*		*	*
Uremia				*		
Vértigo				*		
Vómito	*	*	*	*	*	*

TABLA 1.3.2. EFECTOS TOXICOS CAUSADOS POR LA INGESTION DE ALGUNOS METALES PESADOS PRESENTES EN LAS - - AGUAS.



Acaricidas	{ Orgánicos	{ Clorados (keltane) Sulfoclorados (Ovex)	
Nematicidas	{ Orgánicos	{ Clorados (Telone) Clorobromados (Fumazone)	
Fungicidas	{ Orgánicos	{ Tiocarbonatos (Zineb). Clorados (Captan, HCH) Mercuriales (Ceresan)	
	{ Inorgánicos	{ Azufre Oxicloruro de cobre	
	{ Inorgánicos	{ Con mercurio (calometanos) Sales de ácidos (clorato sódico)	
Rodenticidas	{ Orgánicos	{ Deriv. de ácido fenixiacéticos (2, 4D, 2, 4, 5-T) Deriv. de triazina (atrizina) Deriv. de urea (Diuron)	
	{ Inorgánicos	{ Carbonato de bario)	
	{ Orgánicos.	{ Naturales (escila).	
		{ Síntesis	{ Deriv. cumarina (Tomorin). Deriv. tiourea (Antu).

TABLA 1.3.3. CLASIFICACION DE LOS PLAGUICIDAS.

	COMPUESTO QUIMICO	PERIODO DE PERSISTENCIA
I N S E C T I C I D A	ALDRIN	3 años
	CLORDANO	4 años
	D.D.T.	10 años
	DIELDRIN	8 años
	HEPTACLORO	35 años
	LINDANO	65 años
H E R B I C I D A	AMIBEN	menos de 2 meses
	AMITROL	
	2, 4-D	
	IPC	de 2 a 4 meses
	DALAPON	
	NEBURON	
	MCPA	de 2 a 4 meses
	TCA	
	MONURON	
2, 4, 5-T	más de 6 meses	
2, 3, 6 TBA		
TRIAZINAS		
F U N G I C I D A	CAPTAN	más de 65 días
	FERBAM	20 días
	NABAM	más de 20 días
	ZIRAM	más de 35 días

TABLA 1.3.4. PERSISTENCIA DE PLAGUICIDAS EN EL SUELO.

D ($10^{-6} \text{cm}^2/\text{seg}$)							
Cation	0°C	18°C	25°C	Anion	0°C	18°C	25°C
H ⁺	56.10	81.70	93.10	OH ⁻	25.60	44.90	52.70
Na ⁺	6.27	11.30	13.30	CL ⁻	10.10	17.10	20.30
K ⁺	9.86	16.70	19.60	F ⁻	- -	12.10	14.60
Mg ²⁺	3.56	5.94	7.05	Br ⁻	10.50	17.60	20.10
Ca ²⁺	3.73	6.73	7.93	I ⁻	10.30	17.20	20.00
Sr ²⁺	3.72	6.70	7.94	IO ₃ ⁻	5.05	8.79	10.60
Ba ²⁺	4.04	7.13	8.48	HS ⁻	9.75	14.80	17.30
Mn ²⁺	3.05	5.75	6.88	S ²⁻	- -	6.95	- -
Fe ²⁺	3.41	5.82	7.19	HSO ₄ ⁻	- -	- -	13.30
Co ²⁺	3.41	5.72	6.99	SO ₄ ²⁻	5.00	8.90	10.70
Ni ²⁺	3.11	5.81	6.79	NO ₂ ⁻	- -	15.30	19.10
Cu ²⁺	3.41	5.68	7.33	HCO ₃	- -	- -	11.80
Zn ²⁺	3.35	6.13	7.15	CO ₃ ²⁻	4.39	7.80	9.55
Cd ²⁺	3.41	6.03	7.17	HPO ₄ ⁻	- -	7.15	8.46
Pb ²⁺	4.56	7.95	9.45	HPO ₄ ²⁻	- -	- -	7.34
Cr ⁶⁺	- -	3.90	5.94	PO ₄ ³⁻	- -	- -	6.12
Fe ³⁺	- -	5.28	6.07	NO ₃ ⁻	9.78	16.10	19.00
AL ³⁺	2.36	3.46	5.59	CrO ₄ ²⁻	5.12	9.36	11.20

TABLA 2.2.1.1 Coeficiente de difusión de algunos Iones diluidos en agua a diferentes temperaturas.

SUSTANCIAS	$D_m \times 10^5$ $\text{cm}^2/\text{seg.}$	$D_m \times 10^9$ $\text{m}^2/\text{seg.}$
O ₂	1.80	
CO ₂	1.50	
NO ₂	1.51	
NH ₃	1.76	
Cl ₂	1.22	
H ₂	5.13	
N ₂	1.64	
HCL	2.64	
H ₂ S	1.41	
H ₂ SO ₄	1.73	
HNO ₃	2.60	
NaOH	1.51	

TABLA 2.2.1.2 COEFICIENTES DE DIFUSION MOLECULAR DE ALGUNAS SUSTANCIAS EN AGUA A 20° C.

x	erf x	erfc x	x	erf x	erfc x
-	-1.0	2.0	0	0	1.0
-3.0	-1.0	2.0	0.1	0.1125	0.8875
-2.8	-0.9999	1.9999	0.2	0.2227	0.7773
-2.6	-0.9998	1.9998	0.3	0.3286	0.6714
-2.4	-0.9993	1.9993	0.4	0.4284	0.5716
-2.2	-0.9981	1.9981	0.5	0.5205	0.4795
-2.0	-0.9953	1.9953	0.6	0.6039	0.3961
-1.8	-0.9891	1.9891	0.7	0.6778	0.3222
-1.6	-0.9763	1.9763	0.8	0.7421	0.2579
-1.4	-0.9523	1.9523	0.9	0.7969	0.2031
-1.2	-0.9103	1.9103	1.0	0.8427	0.1573
-1.0	-0.8427	1.8427	1.2	0.9103	0.0897
-0.9	-0.7969	1.7969	1.4	0.9523	0.0477
-0.8	-0.7421	1.7421	1.6	0.9763	0.0237
-0.7	-0.6778	1.6778	1.8	0.9891	0.0109
-0.6	-0.6039	1.6039	2.0	0.9953	0.0047
-0.5	-0.5205	1.5205	2.2	0.9981	0.0019
-0.4	-0.4284	1.4284	2.4	0.9993	0.0007
-0.3	-0.3286	1.3286	2.6	0.9998	0.0002
-0.2	-0.2227	1.2227	2.8	0.9999	0.0001
-0.1	-0.1125	1.1125	3.0	1.0	0
0	0	1.0		1.0	0

TABLA 2.2.1.3. Valores de la función error y del complemento de la función error para valores positivos y negativos del argumento x.

	$g\Delta e$	D	k	Dm	U	u_1	u_2
	a	b	c	1	2	3	4
F	1	0	0	0	0	1	1
L	-3	2	1	2	1	-2	-2
T	0	-1	-1	-1	-1	1	1

TABLA 2.2.2.1 Unidades fundamentales que intervienen para el análisis dimensional del fenómeno de la dispersión.

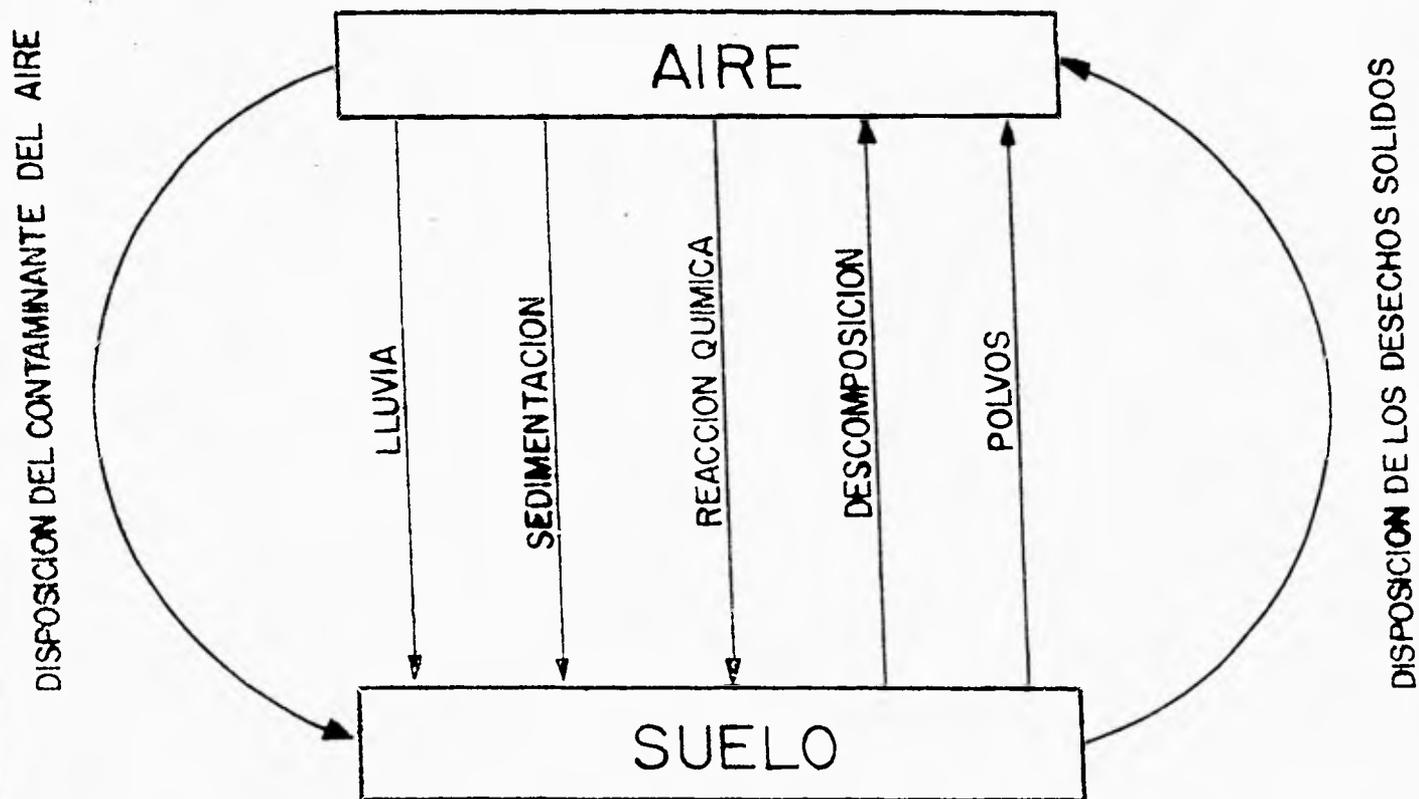


FIG. 1.1.1 INTERACCIONES DE CONTAMINANTES ENTRE EL AIRE Y EL SUELO

DISPOSICION DE CONTAMINANTES DEL AGUA

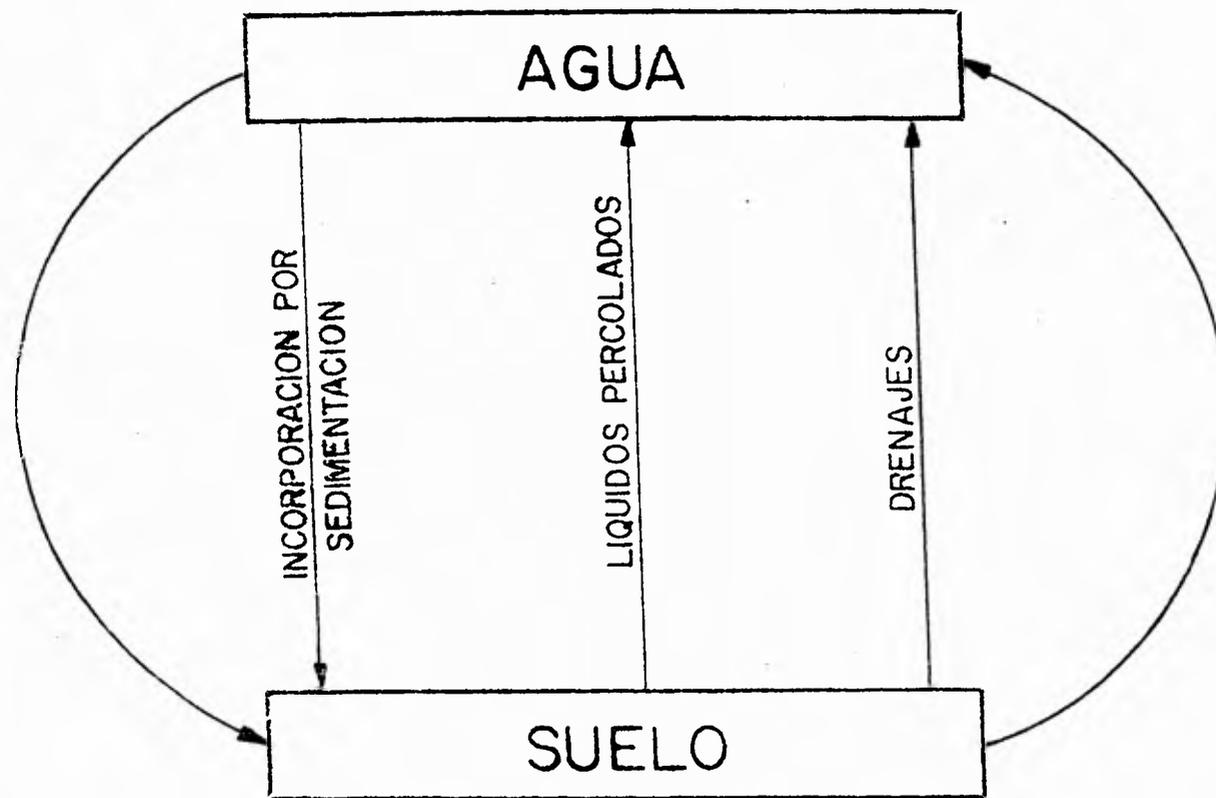


FIG. 1.1.2 INTERACCIONES DE CONTAMINANTES ENTRE EL AGUA Y EL SUELO

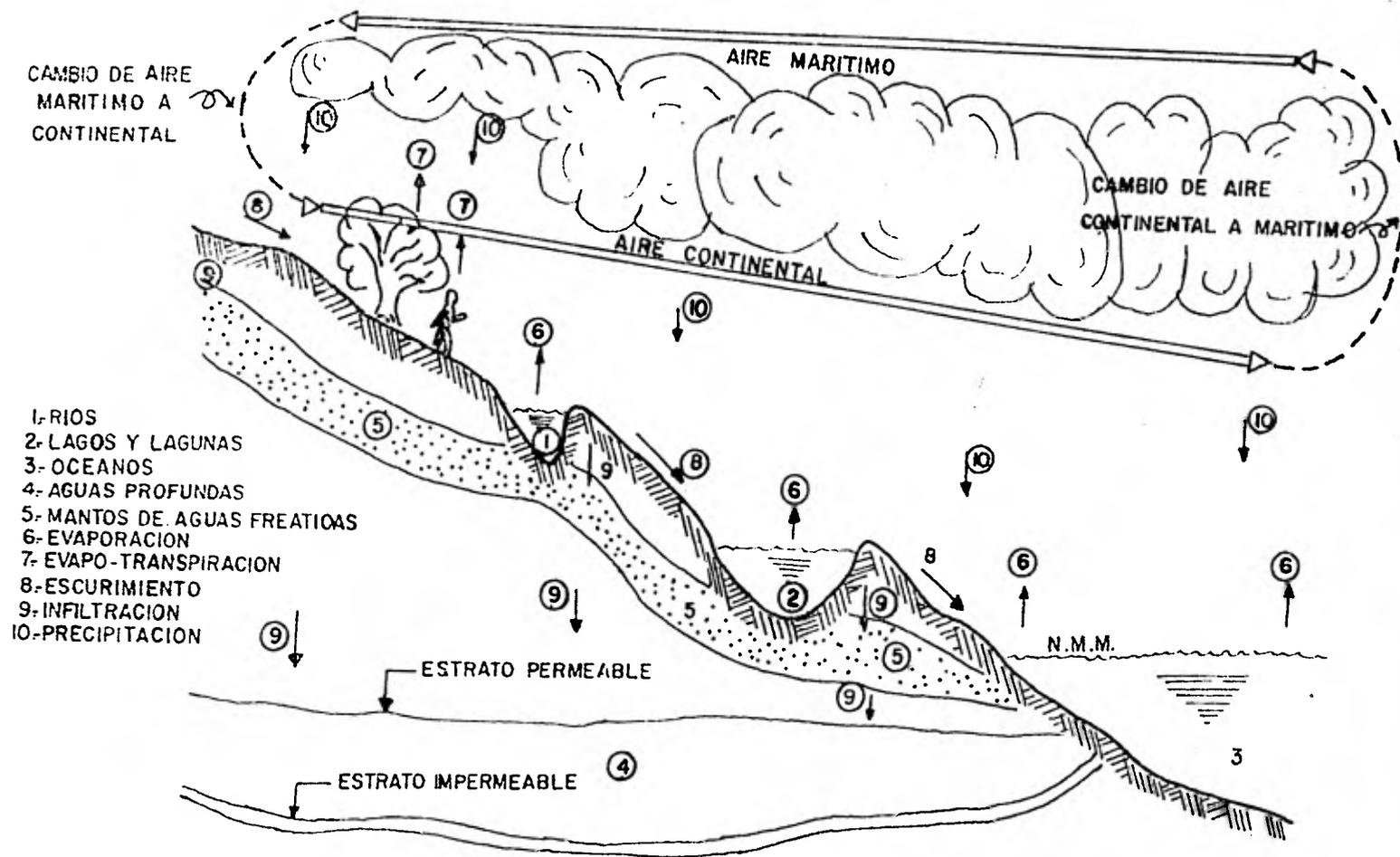


FIG. I.1.3 CICLO HIDROLOGICO

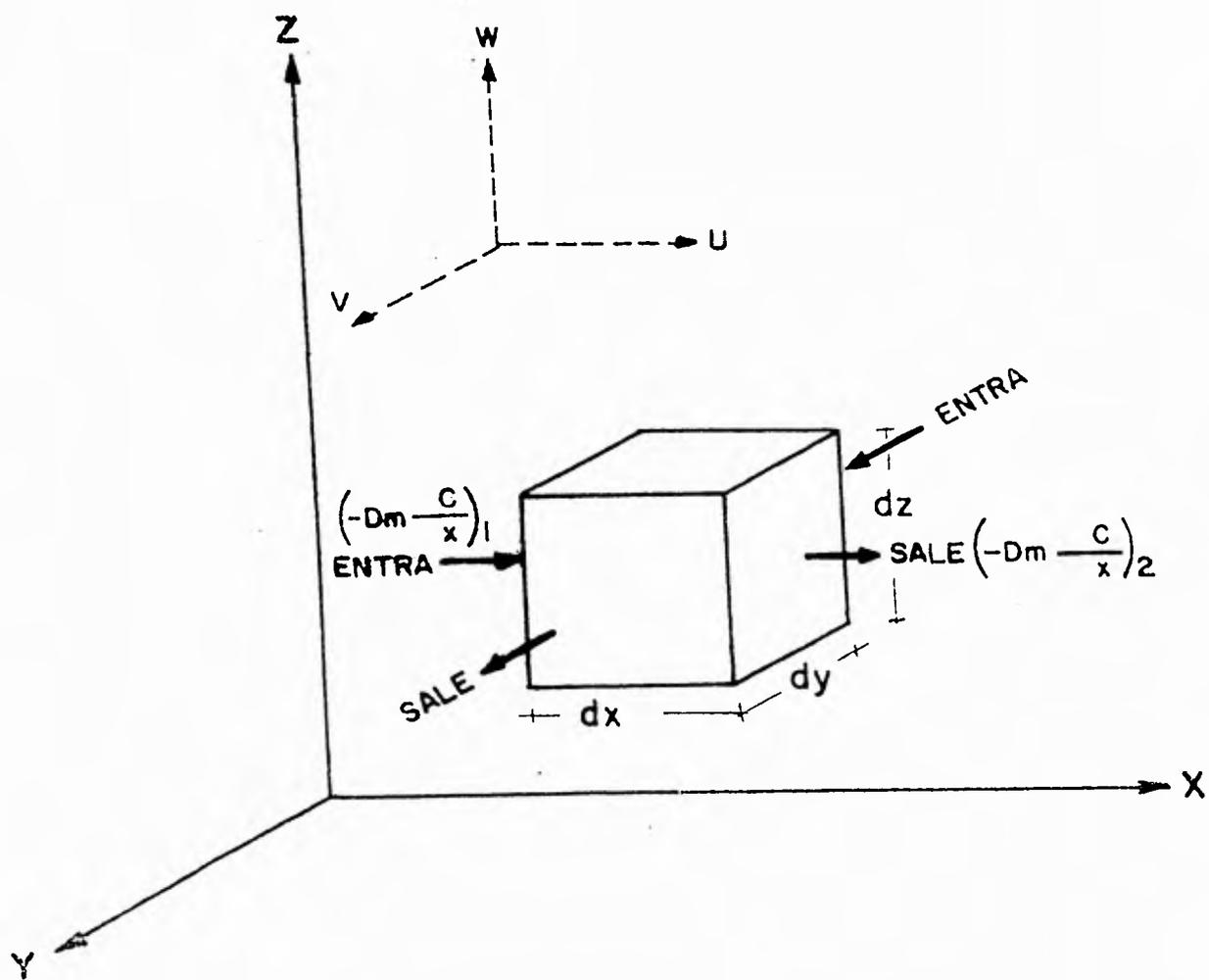


FIG. 2.1.1. DIAGRAMA DE DEFINICIONES

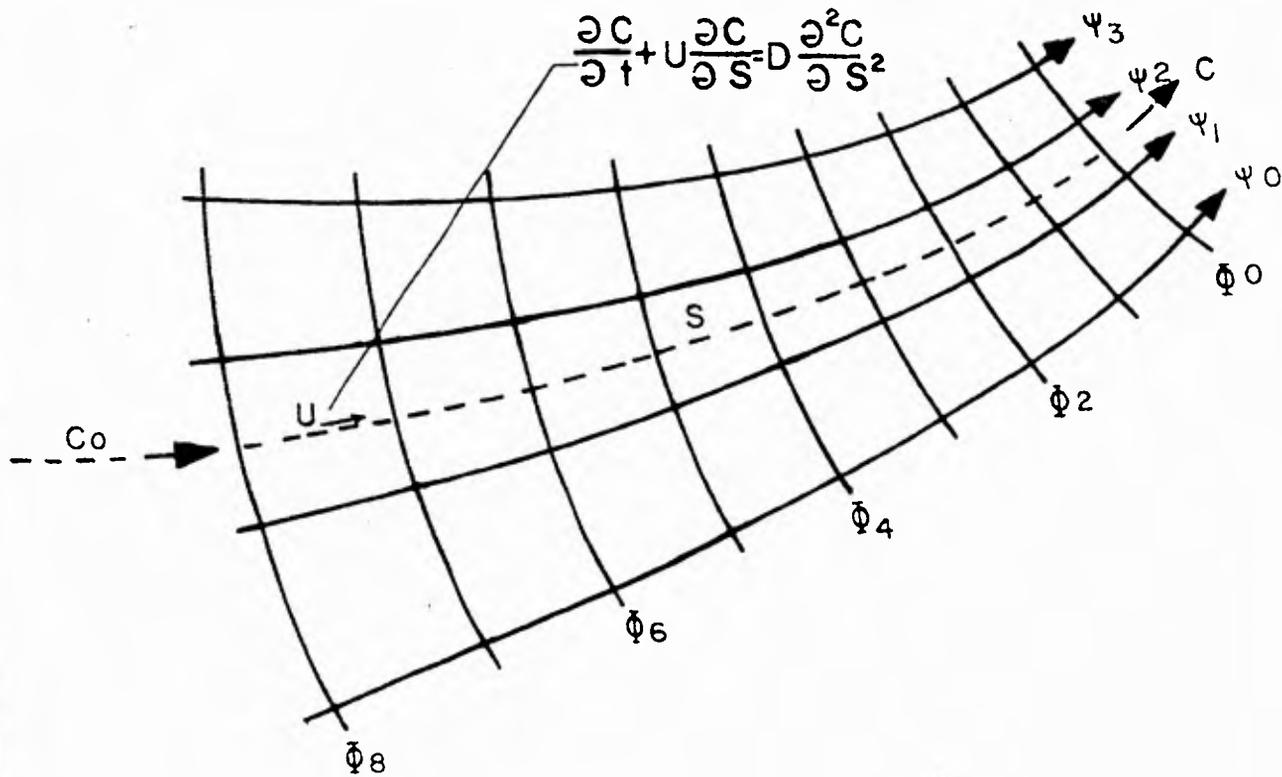
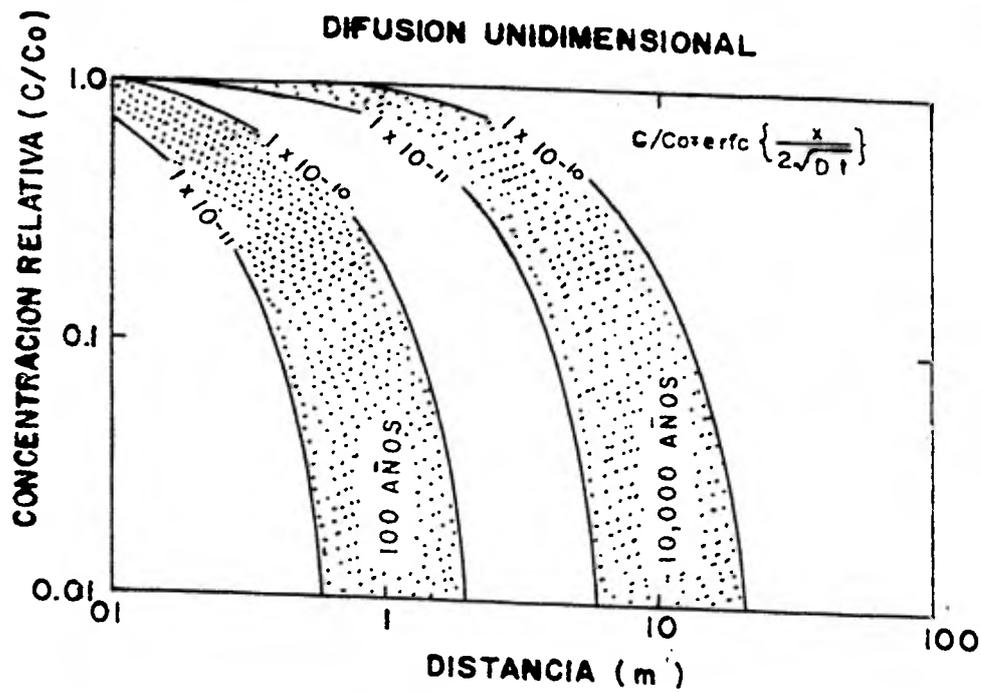


FIG. 2.1.2. MOVIMIENTO DEL CONTAMINANTE EN UN EJE S
PARALELO AL FLUJO.



$10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} > \text{COEFICIENTE DE DIFUSION (D)} > 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

FIG. 2.2.1.1. MOVIMIENTO DE UN CONTAMINANTE POR DIFUSION MOLECULAR UNICAMENTE, DESDE UN ORIGEN DONDE $C=C_0$ A UN TIEMPO $t > 0$

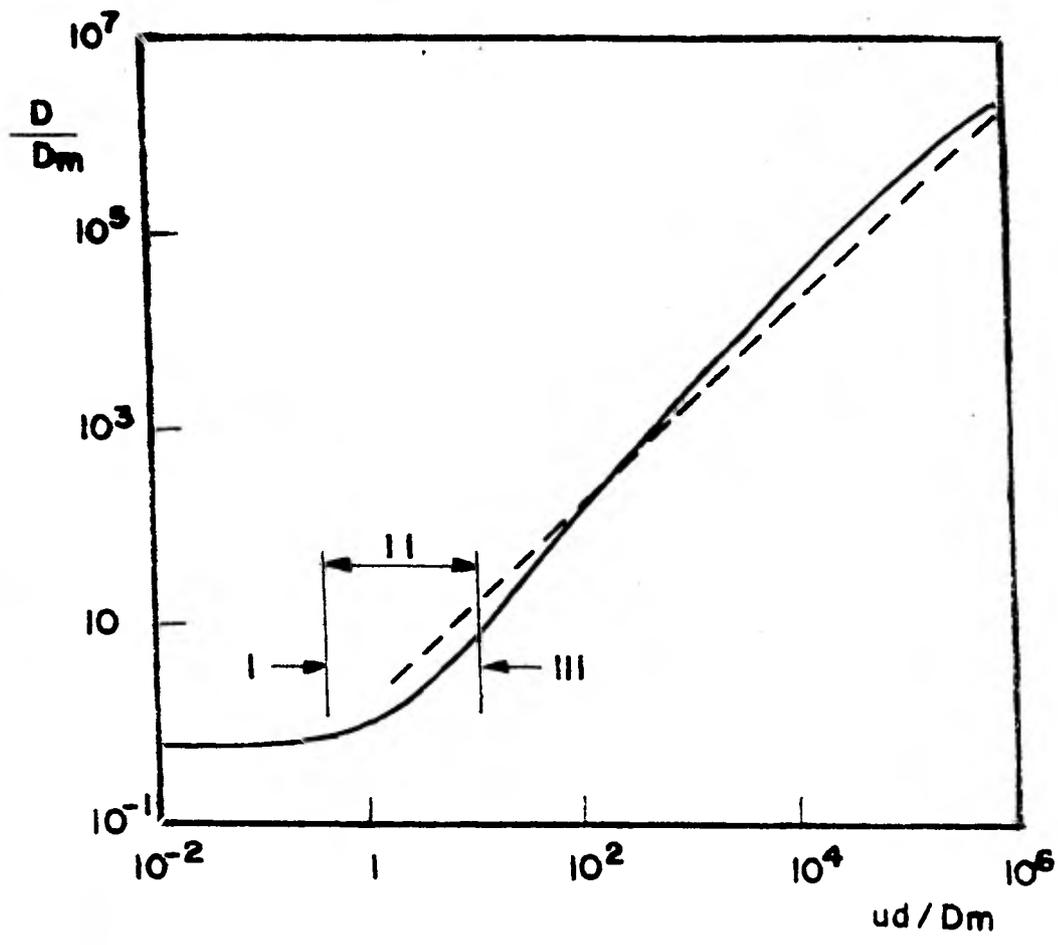


Fig. 2.2.2.1. Coeficiente de dispersión

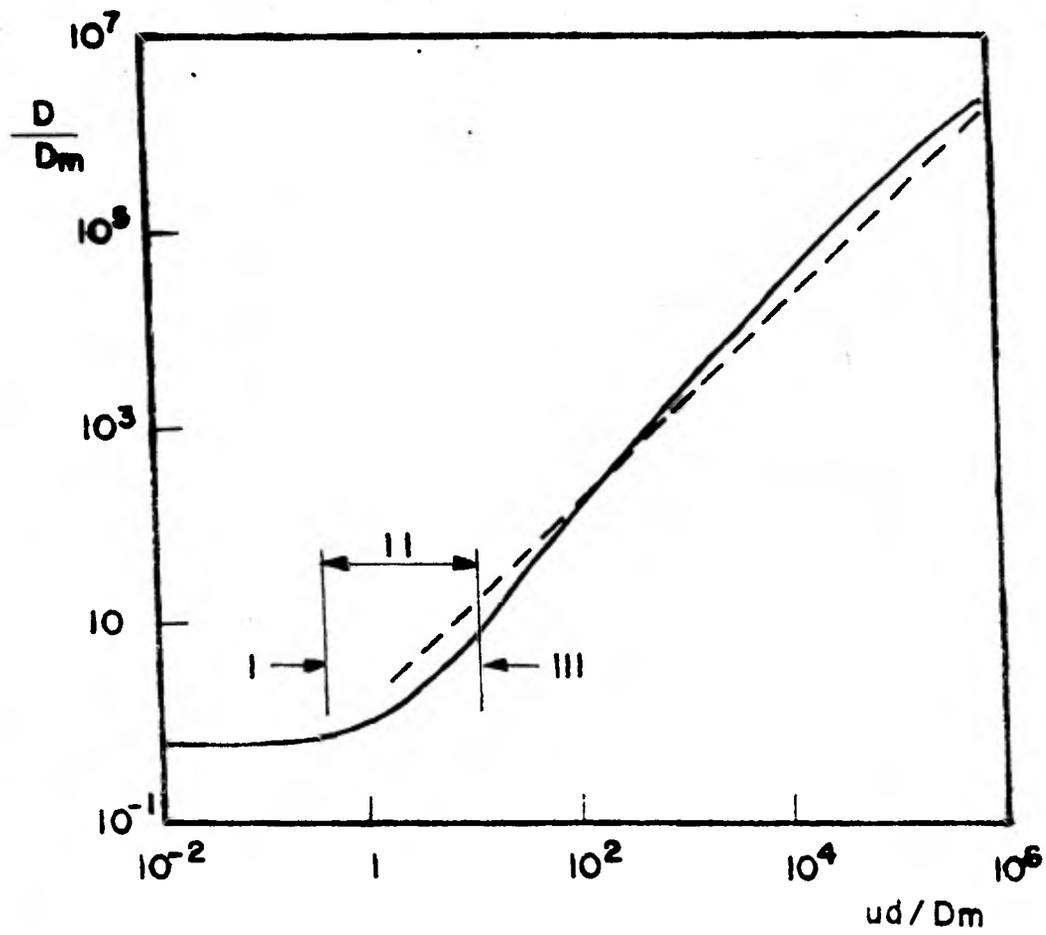


Fig. 2.2.2.1. Coeficiente de dispersión

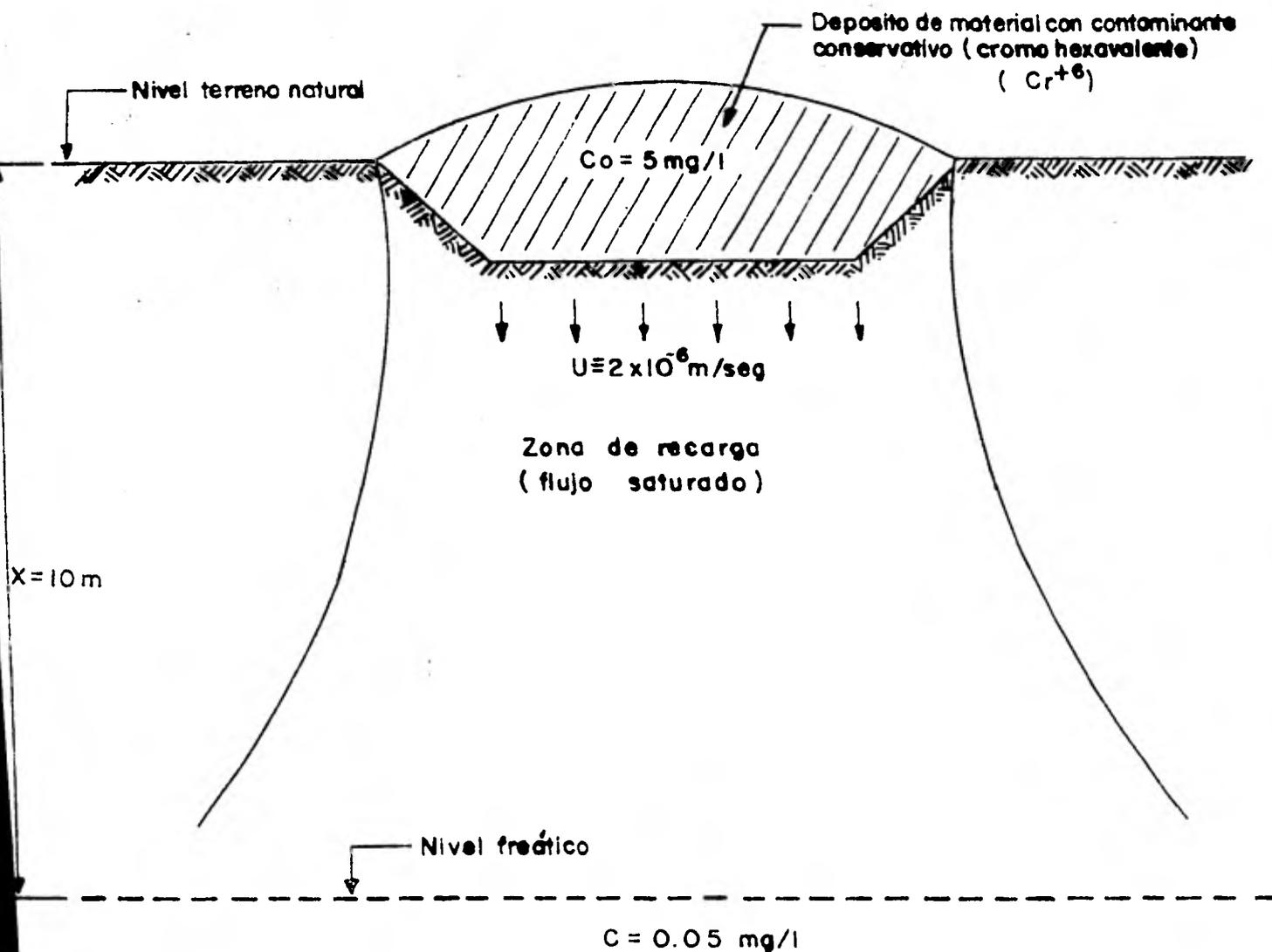
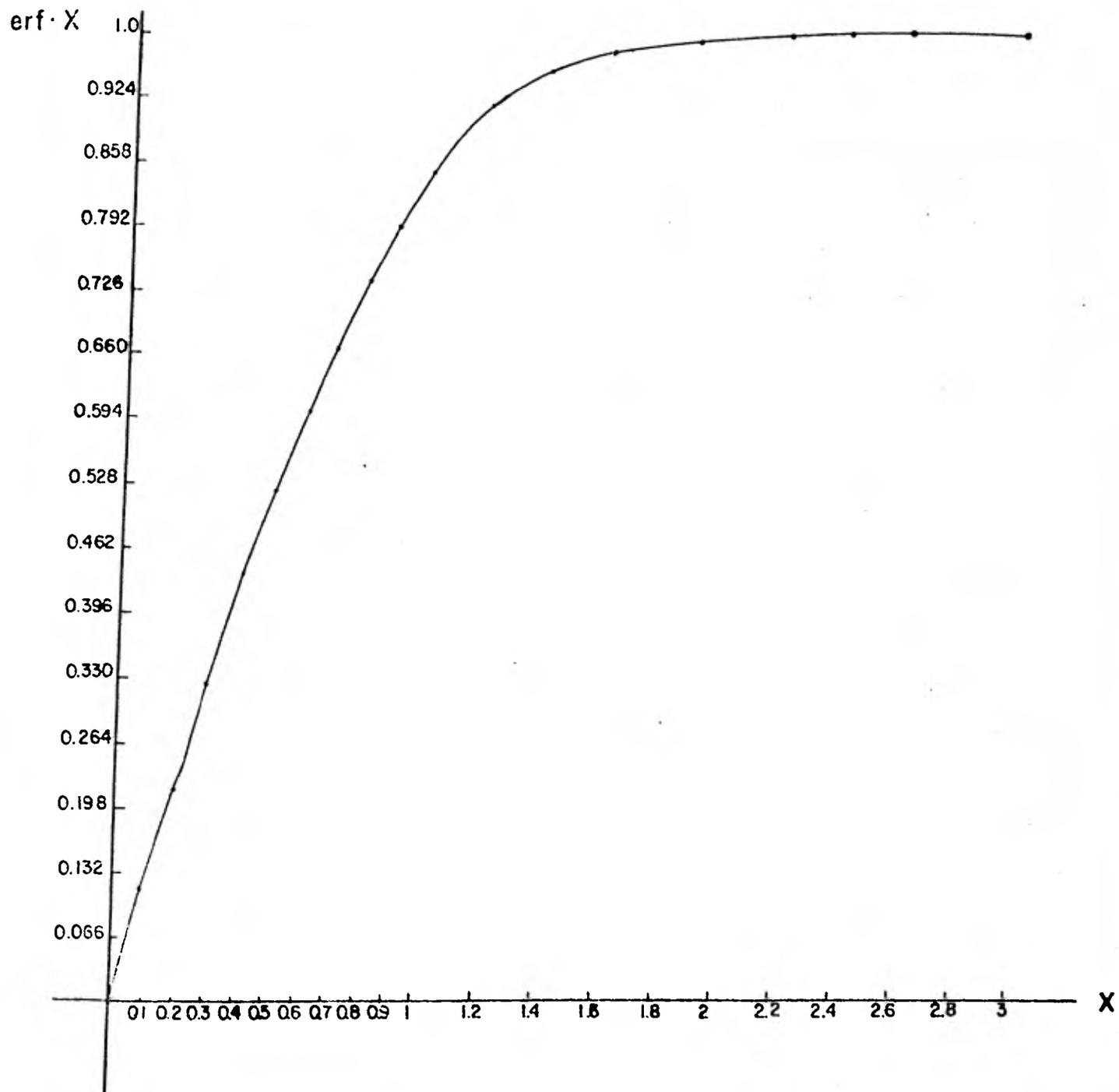
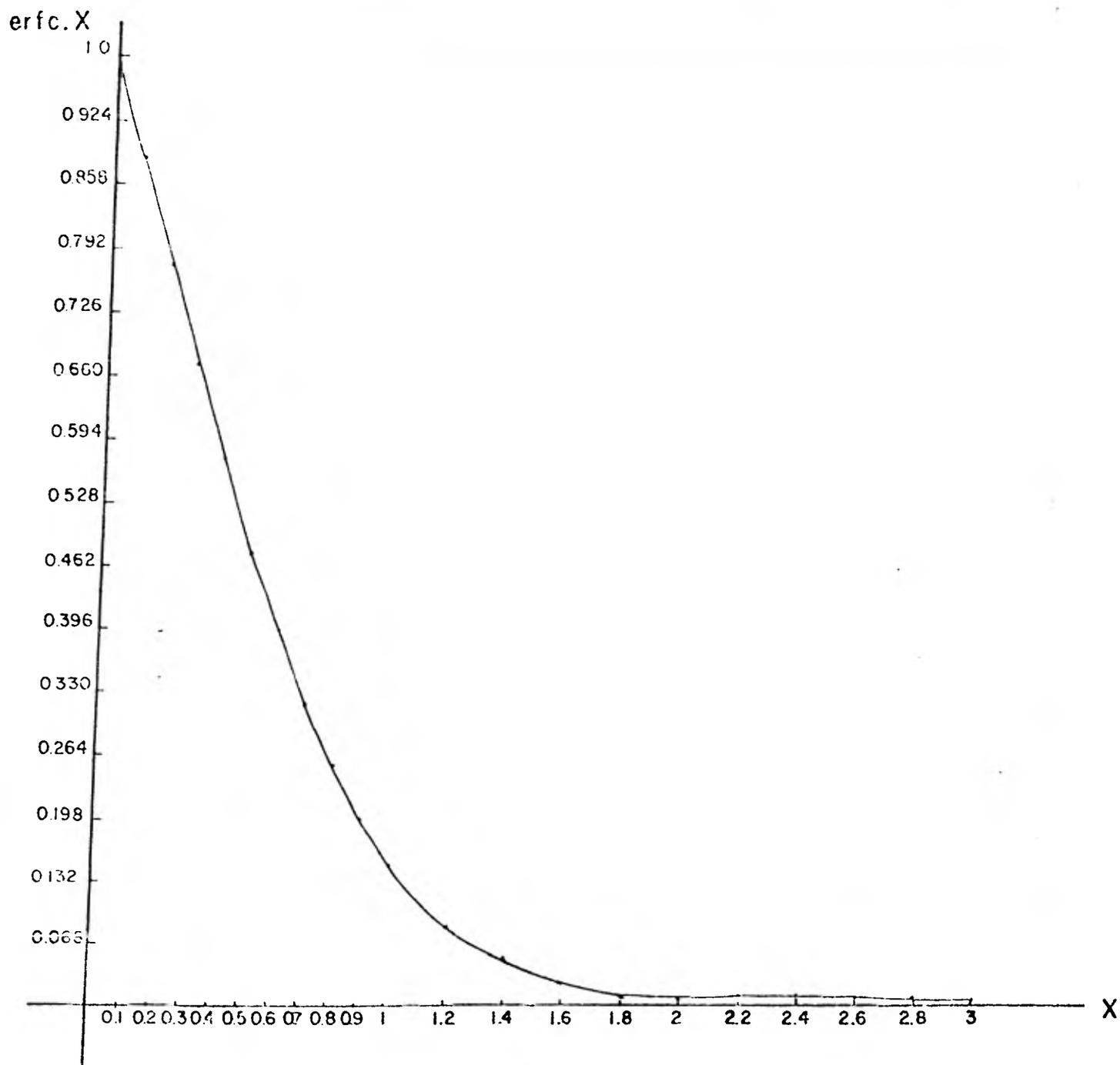


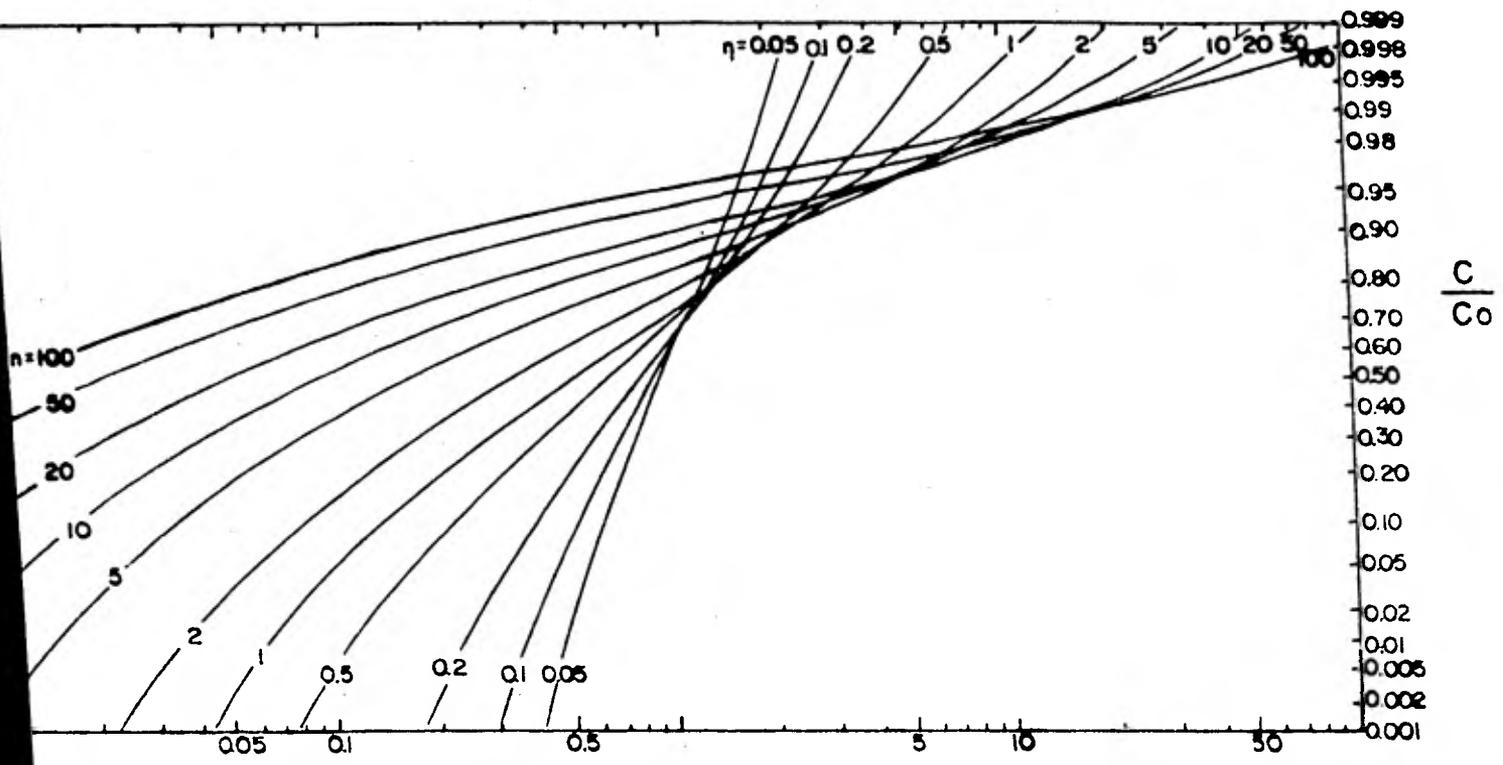
Fig. 3.1.1 DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL PROBLEMA DE APLICACION



GRAFICA 4.1 Representación de los valores de la función error y del argumento X para valores positivos



GRAFICA 4.2 Representación de los valores del complemento de la función error y del argumento X para valores positivos .



GRAFICA 4.3 Representación de los valores de la concentración relativa y las variables de la ecuación (3.1.2 4)

