

FUNDACIÓN



**“DIFUSIÓN DE SUSTANCIAS EN REDES DE
TUBERÍAS FUNCIONANDO A PRESIÓN Y
ALGUNAS APLICACIONES”**

Cecilia Chávez Zavala

31

CUADERNOS FICA

M É X I C O
1 9 9 9

Consejo Directivo de la Fundación ICA.

Presidente.

Ing. Bernardo Quintana.

Vicepresidentes.

Dr. José Sarukhán Kérmez

Dr. Guillermo Soberón Acevedo

Ing. Guillermo Guerrero Villalobos

Ing. Raúl López Roldán

Director Ejecutivo.

Ing. Fernando O. Luna Rojas

Cuerpos Colegiados de los Programas Operativos.

Comité de Becas.

Dr. Juan Casillas García de León

Dr. Sergio Gallegos Cazares

Ing. Miguel Angel Parra Mena

Comité de Premios.

Dr. Luis Esteva Maraboto

M. en I. Mario Ignacio Gómez Mejía

Ing. Gregorio Farías Longoria

Comité de Publicaciones.

Dr. Oscar González Cuevas

Dr. Horacio Ramírez de Alba

M. en I. Gabriel Moreno Pecero

Ing. Santiago Martínez Hernández

Ing. Gilberto García Santamaría González

Comité de Investigación.

Dr. José Luis Fernández Zayas

Dr. Bonifacio Peña Pardo

Dr. Ramón Padilla Mora

Dr. Roberto Meli Piralla

FUNDACIÓN



**“DIFUSIÓN DE SUSTANCIAS EN REDES DE
TUBERÍAS FUNCIONANDO A PRESIÓN Y
ALGUNAS APLICACIONES”**

Cecilia Chávez Zavala

31

CUADERNOS FICA

M É X I C O
1 9 9 9

**©Derechos Reservados 1999
Fundación ICA, A.C.**

**Av. del Parque 91
Colonia Nápoles
C.P. 03810 México, D.F.**

**Tel. 56 69 39 85, 52 72 99 91 y 52 72 99 15
Ext. 4000-4001
Fax. 4083**

**e-mail: lunaf@fundacion-ica.org.mx
<http://www.fundacion-ica.org.mx>**

**ISBN 968-7508 58-2
ISSN 1405-387X**

Impreso en México.

DIFUSIÓN DE SUSTANCIAS EN REDES DE TUBERÍAS FUNCIONANDO A PRESIÓN Y ALGUNAS APLICACIONES

CONTENIDO

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. FUNCIONAMIENTO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN**
 - 2.1 Cálculo de redes**
- 3. DIFUSIÓN DE SUSTANCIAS EN REDES DE TUBERÍAS**
 - 3.1 Difusión molecular**
 - 3.2 Difusión por convección**
 - 3.3 Difusión turbulenta**
 - 3.4 Difusión por reacción**
 - 3.5 Ecuación diferencial**
 - 3.6 Solución de ecuación diferencial**
 - 3.7 Balance de masas en los nudos (confluencia de varias tuberías).**
- 4. MÉTODO PARA CALCULAR LA CONCENTRACIÓN DE LA SUSTANCIA**
- 5. LA APLICACIÓN DEL MÉTODO**
- 6. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA VALIDAR EL MODELO NUMÉRICO**
 - 6.1 Dispositivo físico en el laboratorio**
 - 6.2 Análisis de resultados**
- 7. CONCLUSIONES**
 - 7.1 Métodos propuestos**
 - 7.2 Dispositivo físico**
- 8. BIBLIOGRAFÍA**

M. en I. Cecilia Chávez Zavala

Nació en México D.F., el 24 de febrero de 1965. Es ingeniera Civil de la Universidad Nacional Autónoma de México, obtuvo su título el 26 de octubre de 1995, recibió mención honorífica en su examen profesional con la tesis "Modelación matemática y calibración de un nuevo método de lavado de filtros profundos".

A fines de 1995 obtuvo una beca de la Fundación ICA para realizar estudios de posgrado en la Maestría en Ingeniería con especialidad en Hidráulica en la división del Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, grado que obtuvo el 5 de marzo de 1999.

Antes de entrar a la vida ingenieril, obtuvo el título de maestra de grupo en la Escuela Nacional de Maestros, en junio de 1984, la cual le otorgó una beca para realizar el curso titulado Estudios de perfeccionamiento del profesorado en la Subdirección General de Educación, en el Ministerio de Educación y Ciencia en Madrid, España, en 1986. Así como el curso de conocimientos de material etnohistórico, para Profesores de Enseñanza Preescolar, Primaria y Media, en el Museo Nacional de Antropología, del 24 de septiembre de 1982 al 24 de junio de 1983. Ejerció esta profesión de septiembre de 1984 a febrero de 1989.

Ha tomado otros cursos como expresión oral, comunicación, oratoria y redacción y paquetería de computo (Office97, Visual Basic, Quick Basic, Corel Draw), en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Tiene dominio del idioma inglés.

Ha asistido a diversos congresos entre los que destacan:

- **X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, realizado en Puerto Vallarta, Jalisco, en octubre de 1993.**
- **XVII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, en Cuernavaca, Morelos, en octubre de 1993.**

Ha participado como ponente en:

- **X Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental A.C. con la ponencia "Modelación Matemática y Calibración de un Método de Lavado de Filtros Profundos", en Toluca, México, en febrero de 1996.**
- **XIV Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, con el estudio, "Funcionamiento de la red primaria de distribución de agua potable de la zona metropolitana de la ciudad de México", realizado en Acapulco Guerrero, en octubre de 1996.**

- **XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales A.C., (AIDIS Y FEMISCA), con el estudio “Difusión de una sustancia en redes de agua potable”, en Zacatecas, Zacatecas, en noviembre de 1997.**
- **En el XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, con el estudio “Métodos para determinar la concentración de una sustancia en las redes de tuberías”, en Oaxaca, Oaxaca, en octubre de 1998.**

En su actividad laboral destaca también su participación:

- **Ayudante de profesor Tipo “A”, en la Facultad de Ingeniería, UNAM, con la categoría de ayudante de Profesor Tipo “A”, del 12 de abril de 1993 al 12 de septiembre de 1994.**
- **Ayudante de investigador, en la Coordinación de Ingeniería Ambiental, en el Instituto de Ingeniería, UNAM, de abril de 1994 a octubre de 1995.**
- **Ayudante de investigador, en la Coordinación de Ingeniería Hidráulica, del Instituto de Ingeniería, UNAM, de octubre de 1995 a la fecha:**
- **Ha participado en la producción de informes de circulación restringida, así como en artículos nacionales e internacionales.**

DIFUSIÓN DE SUSTANCIAS EN REDES DE TUBERÍAS FUNCIONANDO A PRESIÓN Y ALGUNAS APLICACIONES.

Ing. Cecilia Chávez Zavala

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha observado un crecimiento acelerado de la población urbana del país. Este fenómeno ha provocado una demanda importante de agua potable en las grandes urbes. El abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, representa un gran reto ingenieril debido a su extensión territorial y al número de personas que la habitan; además es uno de los principales problemas de la metrópoli que requiere ser continuamente atendido para no afectar el suministro del agua a los usuarios.

Cuando se cuenta con la cantidad de agua requerida por una población y se desea mejorar su distribución del agua, en la cantidad suficiente, con una presión conveniente en cualquier momento del día y con la calidad adecuada, es necesario implantar distintas clases de acciones debidamente fundamentadas en estudios.

La modelación de la calidad del agua constituye uno de los temas de mayor auge en el campo de la hidráulica urbana durante los últimos años. La preocupación por la calidad del agua potable mientras permanece en la red de distribución, una vez que ha abandonado la planta de tratamiento o los tanques de almacenamiento, surgió en E.E.U.U. en la década de los ochenta por las normas que estableció la EPA (Environmental Protection Agency) sobre los requisitos de calidad que debía tener el agua al llegar a los puntos de consumo.

El control de la calidad del agua y el análisis del comportamiento hidráulico de las redes han constituido durante mucho tiempo dos campos de estudio independientes en relación con el suministro de agua potable a las poblaciones. Por otra parte, en las plantas de tratamiento de agua potable se pretende asegurar que el agua cumpla con los requisitos de calidad establecidos, tomando como referencia usualmente el punto de salida de la planta o el de entrada a la red.

Los modelos hidráulicos se han utilizado, tanto en la fase de proyección como en la de operación de la red, para garantizar fundamentalmente que el agua llegue a los puntos de consumo en las condiciones de presión y caudal requeridas, sin preocuparse por la calidad del agua en el momento de ser consumida. Sin embargo, a lo largo de la historia se han registrado diversos incidentes que evidencian que la calidad del agua potable puede verse muy afectada durante su recorrido desde las fuentes de suministro (plantas de tratamiento o los tanques de almacenamiento) hasta el punto de consumo. Durante el tiempo que el agua permanece en la red, las sustancias más

reactivas contenidas en la misma, como por ejemplo el cloro utilizado como desinfectante, reaccionan o se combinan con otras sustancias presentes en el agua o adheridas a las paredes de las tuberías. En el caso de los desinfectantes, su concentración disminuye a través de la red favoreciendo el crecimiento bacteriológico, con el consiguiente riesgo sanitario si no se garantiza una concentración mínima.

En México, los parámetros de calidad que debe cumplir el agua potable están determinados por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (publicada en el Diario Oficial, el jueves 18 de enero de 1996), acorde con las directrices comunitarias. A nivel internacional, la EPA determina las pautas a seguir en el control de la calidad del agua potable a través de la Safe Drinking Water Act.

Los modelos de calidad de agua permiten determinar, en todos los puntos de la red y en cualquier instante del período de simulación, la concentración o el valor de un determinado parámetro de calidad, el porcentaje de procedencia del agua desde cada una de las fuentes de suministro, el tiempo de retención del agua en la red antes de ser consumida, y el trayecto seguido en la red desde su inyección. El cálculo puede referirse tanto a parámetros o sustancias conservativas, es decir, aquellas que no cambian o no reaccionan mientras permanecen en la red, como a sustancias no conservativas cuando sí reaccionan.

Los modelos de calidad que se han aplicado en el análisis de las redes de distribución de agua, pueden clasificarse, en función de la variable de tiempo, en modelos estáticos y modelos dinámicos. En los modelos estáticos se supone que los gastos demandados y suministrados a la red permanecen constantes, y se admite que no varían las condiciones de operación de la red, definidas por el estado de las válvulas y el equipo de bombeo, y por los niveles en los depósitos. En los modelos dinámicos, en cambio, se permite la variación temporal de los caudales demandados e inyectados, y también de las condiciones de operación de la red.

Los modelos de calidad se componen básicamente de dos partes: la modelación hidráulica y modelación de la calidad del agua propiamente dicha. Los modelos hidráulicos determinan los gastos y las presiones en la red bajo determinadas condiciones iniciales y de contorno y los modelos de calidad determinan la variación temporal y espacial de un determinado parámetro de calidad del agua. Estas dos modelaciones pueden realizarse conjuntamente, o bien, se puede desarrollar primero la modelación hidráulica y utilizar posteriormente los resultados hidráulicos para llevar a cabo la modelación de la calidad de agua.

El presente estudio tiene como objetivo principal proponer un modelo matemático que simule la propagación de una sustancia en el agua que fluye en una red de tuberías durante un día. Su aplicación principal se refiere a la

determinación de la concentración de cloro residual en distintos puntos de dicha red, en cualquier momento del día tomando en cuenta el cambio temporal de los gastos que circulan en sus tuberías.

Con base en este modelo se estima la concentración de cloro en distintas zonas para revisar si el cloro residual es mayor al requerido; con lo cual se encuentran las zonas de la red donde se alcanza a difundir adecuadamente y se ubican los puntos de la red donde existe déficit de cloro.

En la Ciudad de México el agua ingresa a la red por medio de tanques de regulación. Los gastos de salida de los tanques de regulación quedan definidos por la elevación del agua que almacenan, las características de sus tuberías (diámetros, longitud, material, etc.) y los gastos que demandan los usuarios.

Cuando una red de distribución tiene más de un tanque de regulación, el gasto promedio que en un día sale de un tanque en particular, rara vez coincide con el gasto medio que entra a él (proveniente de alguna de la fuente de abastecimiento), lo que desajusta el funcionamiento de la red. Otras veces sucede que, durante cierto tiempo algunos tanques reciben agua de la red en vez de proporcionarla a ella.

Para evitar las condiciones anteriores se deben operar válvulas instaladas en las tuberías conectadas a los tanques, con la intención de que el gasto promedio de salida del tanque hacia la red sea igual al gasto promedio que recibe. De esta manera, los tanques recuperan sus niveles de agua después de un día de servicio y quedan preparados para operar al día siguiente.

El método que aquí se propone también permite determinar la zona cubierta por la red de distribución que se abastece desde cada tanque a la misma; ello toma en cuenta la operación de válvulas que se realiza en sus tuberías de salida.

Para simular el funcionamiento hidráulico de una red de tubos, existen diversos métodos de cálculo, algunos de los cuales se aplican a través de programas de cómputo comerciales con presentaciones muy atractivas. Los modelos utilizados en este estudio fueron elaborados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, y consideran la variación de la demanda en el tiempo y el efecto de la variación de niveles en los tanques. La simulación del flujo en la red permite conocer sus presiones, los gastos que circulan en ella y las cargas sobre terreno en cada nudo.

Con la información anterior se procede a calcular la concentración en cada nudo de la red, para lo cual primero se determina la variación de la concentración a lo largo de cada una de las tuberías que conforman la red.

Para conocer la concentración a lo largo de una tubería se utiliza el esquema numérico de flujo corregido, que resuelve la ecuación de la variación de la concentración a través del tiempo, en la cual sólo se consideró al transporte por convección y su reacción del agua con la sustancia, la solución analítica de esta ecuación es complicada y en ocasiones las condiciones de frontera la hacen imposible de valuar, por ello se ha recurrido a este método numérico para resolverla. El principio fundamental del esquema de flujo corregido es la combinación de un esquema de orden alto con un uno de orden bajo, donde los errores que se presenta uno, son suprimidos por el otro y viceversa, así se obtiene finalmente la solución para ese intervalo de tiempo mezclando los resultados de ambos cálculos.

Una vez conocido el avance de la concentración a través de cada tubería de la red y con la concentración en los extremos, se realizó el balance de concentraciones en cada nudo, considerando si el gasto en un tubo sale o llega al nudo. De esta manera se infiere la calidad de agua presentada en cada nudo de la red.

El método constituye una importante herramienta de trabajo para determinar la forma en que se distribuye el agua en una red de tuberías que es abastecida a partir de varios tanques e imponer las condiciones de operación de válvulas, así como determinar los puntos donde se debe suministrar nuevamente cloro para garantizar su calidad.

2. FUNCIONAMIENTO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

Cuando en una red de tuberías que funciona a presión, los gastos y los niveles piezométricos en cualquier punto de ella no cambian con el tiempo, se tiene el caso de una red con flujo permanente. Para calcular las presiones en los nudos (extremos de las tuberías) y los gastos que circulan en cada una de sus tuberías, es necesario conocer al menos la carga de presión en uno de sus nudos (puede ser el nivel de la superficie libre del agua de un tanque de almacenamiento) y los gastos que salen de la red hacia los usuarios de ella.

Si de la red de tuberías, se extrae una cantidad de agua variable con el tiempo; por ejemplo, para entregar a los usuarios de la red un gasto mayor en cierto momento del día, los caudales que fluyen en las tuberías y las presiones en los nudos cambian con el tiempo. Estas condiciones corresponden a una red con flujo no permanente.

La red de tuberías a la hora de máxima demanda debe tener cargas de presión mayores o iguales a una presión mínima admisible con el fin de garantizar el suministro de agua a los usuarios. También, para la hora de mínima demanda, las cargas de presión no deben exceder una carga máxima de tal manera que no se produzcan gastos de fuga grandes o se dañe a la red.

2.1 Cálculo de redes

Para calcular una red con flujo permanente existen distintos procedimientos entre los que se citan el *Método de Hardy Cross*, el *Método de la teoría lineal* y el de *Newton-Raphson* (Jeppson R., 1976); algunos de los cuales se aplican a través de programas de cómputo comerciales.

Para lograr una simulación del funcionamiento hidráulico de una red de tuberías más apegado a la realidad, se requiere un modelo no permanente que considere la variación en el tiempo de la demanda, los efectos de la variación de niveles en los tanques, del arranque y paro de bombas, las maniobras de operación de válvulas, etc.

En los métodos de cálculo de redes que se mencionan en este trabajo toman en cuenta la posibilidad de que los gastos de salida de la red podrán satisfacer la demanda solamente cuando se cuente con una presión mayor o igual a una presión mínima predeterminada. Además, se considera que el gasto que sale de la red para ser suministrado a los usuarios es función de la presión existente, por lo que la cantidad demandada podría ser mayor al gasto que puede suministrar la red, dando lugar a un déficit en el servicio.

3. DIFUSIÓN DE SUSTANCIAS EN REDES DE TUBERÍAS

Para el estudio del movimiento de un fluido, se consideran diferentes procesos de transferencia de materiales y propiedades de un lugar a otro, así como el mecanismo mediante el cual estos se difunden y transmiten a través del fluido.

En el presente estudio, para el caso de la sustancia A se vierte en un medio donde la masa es de un fluido B , se prefiere expresar a la concentración como la masa de una sustancia (m_A) contenida en 1 m^3 , entre la masa de la mezcla ($m_A + m_B$) contenida en el mismo 1 m^3 .

La concentración de sustancias contenidas en un flujo de agua está sometida a una serie de transformaciones generados por los siguientes procesos, difusión molecular, transporte convectivo, difusión turbulenta y difusión por reacción.

3.1 Difusión molecular.

El proceso mediante el cual la materia se transporta desde una región de alta concentración a otra de concentración más baja. Para calcular el flujo de masa por unidad de área, se emplea

$$P = -D_m \rho \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

esta ecuación es conocida como Ley de Fick, donde P es el flujo de masa $[\text{M}/\text{T}]$, D_m coeficiente de difusión molecular $[\text{L}^2/\text{T}]$, C es la concentración de la sustancia (adimensional), y ρ densidad o masa específica (M/L^3) .

3.2 Difusión por convección

Los cambios de concentración generados por la velocidad del flujo U se le llama por advección o convección. El flujo de masa de la sustancia A , por unidad de área y tiempo se plantea a partir de los elementos considerados en la figura 1.

*Flujo de masa
Que entra*

*Flujo de masa
Que sale*

*Cambio de la masa
en el tiempo*

$$(P + \rho_A U) \Delta y \Delta z - \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x + \rho_A U + \frac{\partial \rho_A U}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2)$$

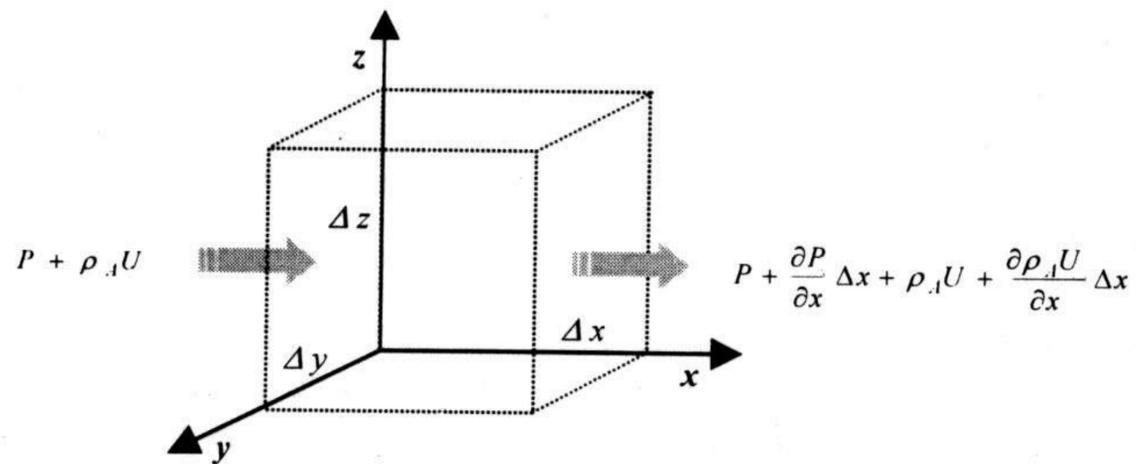


Figura 1. Flujo de masa de la componente A en la dirección x.

simplificando se tiene

$$\frac{\partial C}{\partial t} = U \frac{\partial C}{\partial x} + D_m \rho \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

3.3 Difusión turbulenta.

La turbulencia favorece el mezclado de sustancias. El flujo en las tuberías de agua potable normalmente es turbulento. La velocidad en un punto varía arbitrariamente en sentido y magnitud.

La concentración de la sustancia que se difunde en este caso puede representarse, en forma semejante, como

$$C = \bar{C} + C' \quad y \quad U = \bar{U} + U' \quad (4)$$

se considera en la ecuación 4 que las variables C y U son iguales a una cantidad constante (\bar{C} ó \bar{U}) más una cantidad fluctuante (C' ó U') es decir que si la densidad de la masa total, ρ , es constante

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial C_A}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial C_A}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial C_A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial C_A}{\partial y} \right) + D_{AB} \left[\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \right] + \frac{r_A}{\rho} \quad (5)$$

Los coeficientes E_x y E_y son los coeficientes de difusión turbulenta. Solamente para el caso de turbulencia isotrópica son los mismos en las dos direcciones coordenadas y r_A representa la masa de A producida por unidad de volumen y por unidad de tiempo.

3.4 Difusión por reacción.

Cada sustancia contenida en el agua puede entrar en reacción con otras sustancias, como la que existe en las paredes del tubo, con la propia agua o con microorganismos, es resultado de diferentes procesos químicos o bioquímicos que varía su concentración. Según la forma de reacción, las sustancias en el agua se dividen en tres grupos:

- a) **Conservativas:** No reaccionan con el agua ni con los tubos. El flúor, que a veces se introduce al agua potable para la salud dental, pertenece a este grupo.
- b) **No conservativas y decrecientes.** Su concentración disminuye con el tiempo de permanencia en el agua. Tal es el caso del cloro que se usa como desinfectante.
- c) **No conservativas y crecientes.** Son compuestos químicos que se forman en el agua y su concentración crece con el tiempo de permanencia. Un ejemplo son los trihalometanos que se forman por el contacto del cloro con la materia orgánica contenida en el agua.

La ecuación cinética de primer orden para la reacción de una sustancia con el agua, es del siguiente tipo:

$$\frac{dC}{dt} = K_a C \quad (6)$$

donde C es la concentración y K_a la constante cinética (s^{-1}).

Para la reacción con la pared de los tubos se consideran que:

$$\frac{dC_p}{dt} = K_p C_p \quad (7)$$

donde K_p constante cinética de la reacción con la pared del tubo (en s^{-1}), y C_p es la concentración de la sustancia contenida en la pared de la tubería. Existe una transferencia de masa entre la sustancia contenida en el agua y la de la pared, generada por la diferencia entre las concentraciones en los dos medios. La teoría de transferencia de masa (Bird *et al.*, 1960) maneja la siguiente ecuación para el flujo de masa [$g/(m^2s)$] de la sustancia en este tipo de transferencia:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_{tr} (C - C_p) \quad (8)$$

Donde F es el flujo de masa y K_{tr} es el coeficiente de transferencia de masa entre el flujo de agua y la pared (m/s).

3.5 Ecuación diferencial

La ecuación diferencial se obtiene al efectuar el balance de los flujos de masa que entran y salen de un volumen de control contenido en el flujo con longitud Δx y una sección A igual a la de la tubería, y está expresada mediante:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial C}{\partial x} \right) - U \frac{\partial C}{\partial x} - K_a C - \frac{K_{tr}}{R} (C - C_p) \quad (9)$$

donde C es la concentración, K_a la constante cinética (s^{-1}), K_p constante cinética de la reacción con la pared del tubo (en s^{-1}), C_p es la concentración de la sustancia contenida en la pared de la tubería, K_{tr} es el coeficiente de transferencia de masa entre el flujo de agua y la pared (m/s). E es el coeficiente de difusión turbulenta y U la velocidad de flujo.

En el miembro del lado derecho de la ecuación anterior, el primer término considera la difusión longitudinal, el segundo el transporte de la sustancia por convección y los últimos dos, la reacción con el agua y con las paredes de la tubería.

La influencia del término difusivo en la ecuación 9 se determina por el número de Peclet, que se define con la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{LU}{E} \quad (10)$$

donde L es la longitud de la tubería (m).

Mientras mayor sea el número de Peclet, menor es la importancia del término difusivo en la ecuación. Considerando los valores de L , U y E , en el caso de tuberías de agua potable, el número de Peclet tiene valores muy altos, y el término difusivo se puede despreciar.

El último término de la ecuación 9 $[(K_{tr} / R) (C - C_p)]$, expresa la masa de la sustancia que se transfiere del flujo en la tubería hacia la pared. Se supone que no hay acumulación de la sustancia en la pared; entonces la masa que se transfiere es igual a la que se consume, por lo que

$$\frac{K_{tr}}{R} (C - C_p) = K_p C_p \quad (11)$$

De esta ecuación, la concentración en la pared está dada por:

$$C_p = \frac{K_{tr} C}{RK_p + K_{tr}} \quad (12)$$

Sustituyendo la ecuación 12 en 9 y despreciando el término de difusión se obtiene la siguiente ecuación

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} - KC \quad (13)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{I}{A} \frac{\partial}{\partial x} (CQ) - KC \quad (14)$$

3.6 Solución de la ecuación diferencial

La solución analítica de la ecuación 13 es complicada, y en ocasiones las condiciones de orilla o borde la hacen imposible de valuar. Por ello se ha recurrido a métodos numéricos para resolverla.

La ecuación 13 es una ecuación en derivadas parciales de tipo hiperbólico que puede transformarse en una ecuación diferencial ordinaria válida sobre una línea característica. Tiene la siguiente solución analítica

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (15)$$

que es válida en los puntos de la línea característica definida por

$$\frac{dx}{dt} = U \quad (16)$$

Esta ecuación representa una línea recta en el plano coordenado x, y . La ecuación 15 muestra que la concentración se transmite por la tubería con velocidad U reduciendo su valor por una ley exponencial. Este significado físico se utiliza en la solución numérica.

Existen los esquemas de diferencias de primer orden o de orden bajo, ya que la mayoría de los esquemas numéricos para las EDP hiperbólicas se basan en las aproximaciones por diferencias finitas. Entre los esquemas de orden superior que suelen utilizarse, están los de Lax-Wendroff, Mac Cormack y el progresivo de tercer orden (Nakamura, 1992).

Para mejorar la solución, se dispone del esquema de flujo corregido. El principio fundamental de este esquema es el uso de un esquema de orden bajo en el que existe riesgo de oscilación, pero utilizando también un esquema de orden alto, el efecto del error de perturbación no es tan grande como para provocar la oscilación. En cada intervalo de tiempo, se calculan tanto una solución de orden bajo (con una difusión numérica de segundo orden) como una de orden alto (sin el efecto de la difusión numérica de segundo orden); se obtiene finalmente la solución para ese intervalo de tiempo mezclando los resultados de ambos cálculos.

Dada la mejor aproximación de la simulación numérica con el esquema de flujo corregido, fue utilizado para encontrar la solución de la ecuación 13 a lo largo de una tubería.

En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos con el esquema de flujo corregido (Nakamura, 1992), la propagación de una sustancia dentro de una tubería en diferentes tiempos.

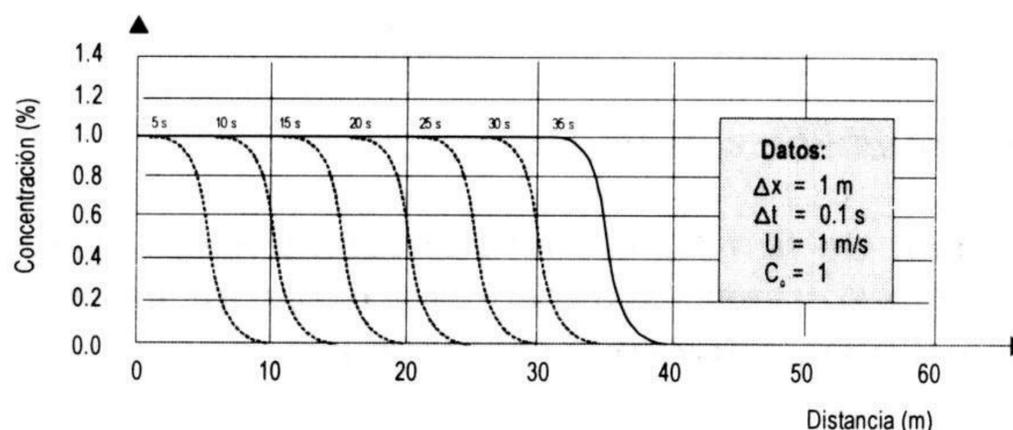


Figura 2. Propagación de una sustancia en una tubería.

3.7 Balance de masa en los nudos (confluencia de varias tuberías).

Las tuberías que se juntan en un nudo se clasifican en dos grupos; el primero está formado por las tuberías con un gasto que llega al nudo y, el segundo con las tuberías que tienen un gasto de salida desde dicho nudo, como se ilustra en la figura 3.

Para la red se considera que las aportaciones de masa de cada una de las tuberías del primer grupo a un nudo en particular es igual a

$$m_i^{k+1} = \sum_{i=1}^N C_{Si}^{k+1} Q_i^{k+1} \Delta t \quad (17)$$

en la ecuación anterior Q_i^{k+1} representa a los gastos de entrada al nudo i desde una tubería del primer grupo, en el instante $k+1$ y N el número de tuberías del primer grupo.

Por otra parte, por las tuberías del segundo grupo egresa desde el nudo un fluido que contiene una mezcla uniforme con concentración C_N^{k+1} , por lo que la masa que sale es

$$m_s^{k+1} = C_N^{k+1} \left(\sum_{i=1}^M G_i + q_E \right) \quad (18)$$

donde q_E es el gasto que se suministra a los usuarios de la red, G_i los gastos de salida por una tubería del segundo grupo y M el número de tuberías del segundo grupo.

Ya que por el principio de conservación de masa, la que entra es igual a la que sale, se tiene que

$$m_i^{k+1} = m_i^{k+1} \tag{19}$$

así al igualar las ecuaciones 17 y 18 se puede despejar a la concentración de la mezcla, de modo que

$$C_N^{k+1} = \frac{\sum_{j=1}^N C_{Sj}^{k+1} Q_i^{k+1}}{\sum_{i=1}^M G_i^{k+1} + q_E^{k+1}} \tag{20}$$

En la figura 4 se representa de forma gráfica la ecuación anterior.

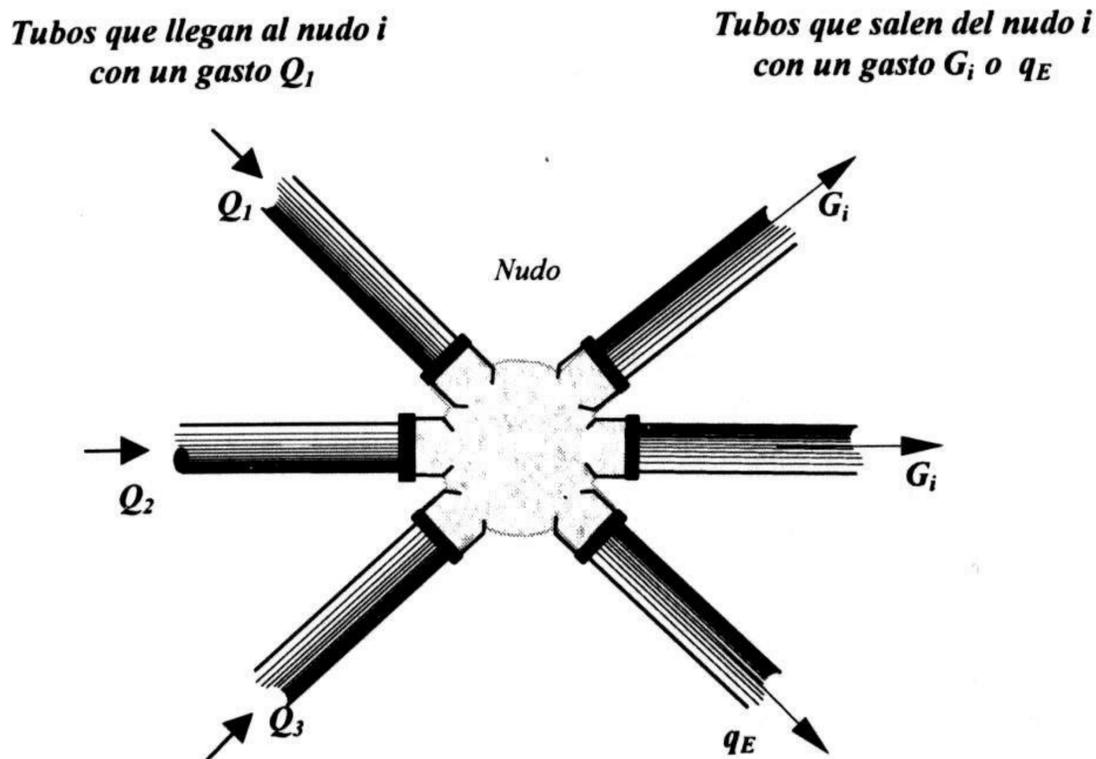


Figura 3. Esquema de tuberías que se juntan en un nudo.

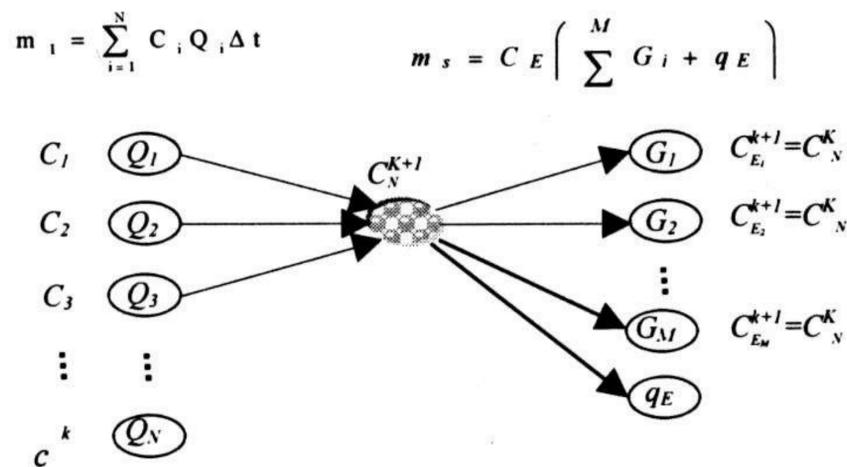


Figura 4. Esquema de un nudo con la simbología elegida.

4. MÉTODO PARA CALCULAR LA CONCENTRACIÓN DE LA SUSTANCIA

Para calcular la concentración en la red, se requiere, como primer paso obtener los gastos en las tuberías de la red y las presiones en sus nudos para el instante $k+1$. Posteriormente se calcula el avance de la concentración en cada tubería utilizando la metodología descrita anteriormente, para un lapso igual o mayor al utilizado en el intervalo de tiempo del modelo matemático que se utiliza para obtener los gastos en las tuberías de la red y las presiones en sus nudos. Con esto se obtiene la concentración en el otro extremo de la tubería que se ha llamado C_{Sj}^{k+1} . Estas concentraciones se consideran en la ecuación 20 de cada nudo de la red para determinar las concentraciones C_N^{k+1} en el extremo de entrada (según el sentido de flujo) de cada tubería j .

Cuando se coloca una sustancia en un tanque de almacenamiento se puede asignar un valor arbitrario a la concentración (así como de darle el valor 1), y luego con la ecuación 20 se obtiene la concentración que existe en los distintos nudos de la red en determinados tiempos de interés.

Cuando esta sustancia corresponde a cloro residual se obtiene en cada nudo y en cualquier tiempo, la concentración de cloro y se revisa si ella es mayor o igual a la requerida para asegurar que cumpla con su misión de desinfectar el agua y destruir microorganismos dañinos. El contenido de cloro residual deberá ajustarse a lo establecido por las normas, que marcan que esté comprendido de 0.2 a 1.5 mg/l para ser aceptable.

Este método sirve para obtener la forma en que se distribuye el agua en una red de tuberías que es abastecida a partir de varios tanques e imponer las condiciones de apertura de las válvulas en sus tuberías de entrega de agua para contar con una adecuada operación del sistema. En este caso, la concentración de sustancias en cada nudo corresponde al grado de influencia que tiene un tanque en él, así se encuentran las zonas que reciben agua de los tanques de almacenamiento.

5. APLICACIÓN DEL MÉTODO

La red de la figura 5 representa una parte de la red de tuberías de agua potable del Distrito Federal, está conformada por 4 tanques de regulación, 139 tubos y 96 nudos. Se calculó la propagación de cloro a través de la red con el método propuesto. Se colocó en los cuatro tanques una concentración de 1.5 mg/l de cloro.

Se aprecia en la figura 6 y en la tabla 1, que la mayor parte de la zona que demanda agua potable que la concentración está dentro del rango permitido, mientras que los nudos 38, 39, 40 y 41 tienen una concentración menor a 0.2 mg/l de cloro; en ellos no se cumple con el valor mínimo, por lo que es necesario aumentar la concentración de cloro en esos nudos.

Tabla 1. Ejemplo de los resultados obtenidos con el modelo, $t = 2$ horas.

Nudo	Concentración (mg/l)	Nudo	Concentración (mg/l)	Nudo	Concentración (mg/l)
23	1.5	2	1.5	49	1.016
15	1.5	3	1.5	69	1.032
22	1.5	13	1.5	71	0.972
87	1.5	64	1.5	28	0.954
9	1.5	76	1.5	27	0.950
10	1.5	77	1.5	54	0.947
17	1.5	78	1.5	47	0.881
24	1.5	80	1.5	50	0.791
8	1.5	81	1.5	46	0.791
11	1.5	83	1.5	51	0.788
25	1.5	84	1.5	52	0.786
19	1.5	183	1.5	48	0.780
18	1.5	398	1.5	59	0.597
36	1.5	409	1.5	86	0.554
12	1.5	410	1.5	75	0.532
44	1.5	1	1.5	73	0.532
42	1.5	82	1.5	74	0.532
4	1.5	408	1.5	72	0.531
45	1.5	26	1.5	61	0.432
35	1.5	32	1.488	60	0.430
33	1.5	85	1.488	58	0.429
43	1.5	65	1.473	63	0.429
5	1.5	68	1.473	53	0.427
30	1.5	70	1.421	62	0.427
34	1.5	20	1.290	57	0.426
7	1.5	14	1.271	56	0.399
29	1.5	66	1.262	**41	0.137
31	1.5	67	1.125	**40	0.0864
6	1.5	55	1.037	**38	0.00863
16	1.5	21	1.036	**39	0.0001875
37	1.5	79	1.036		

** Nudos con concentración menor a 0.2 mg/l

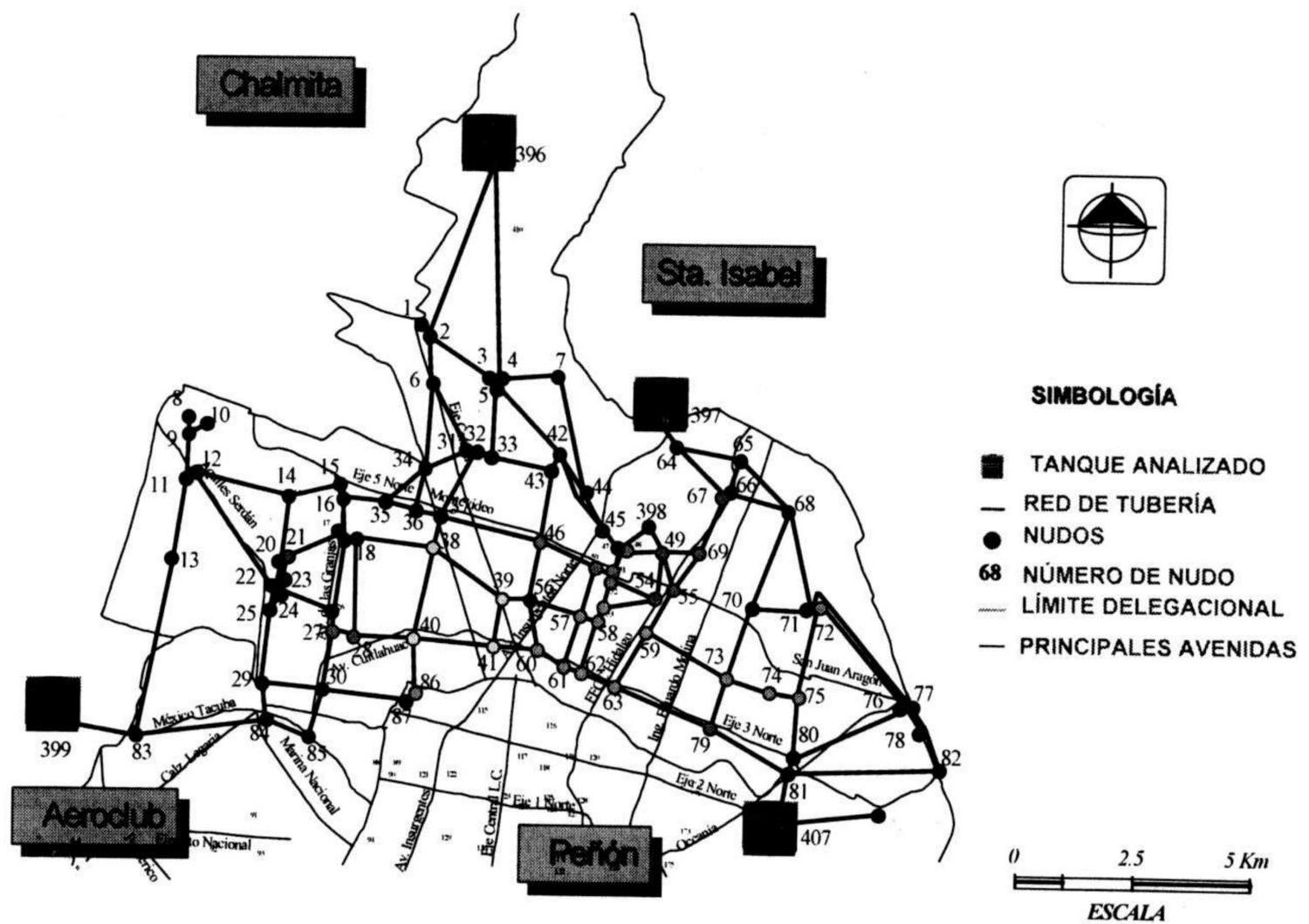


Figura 5. Red analizada

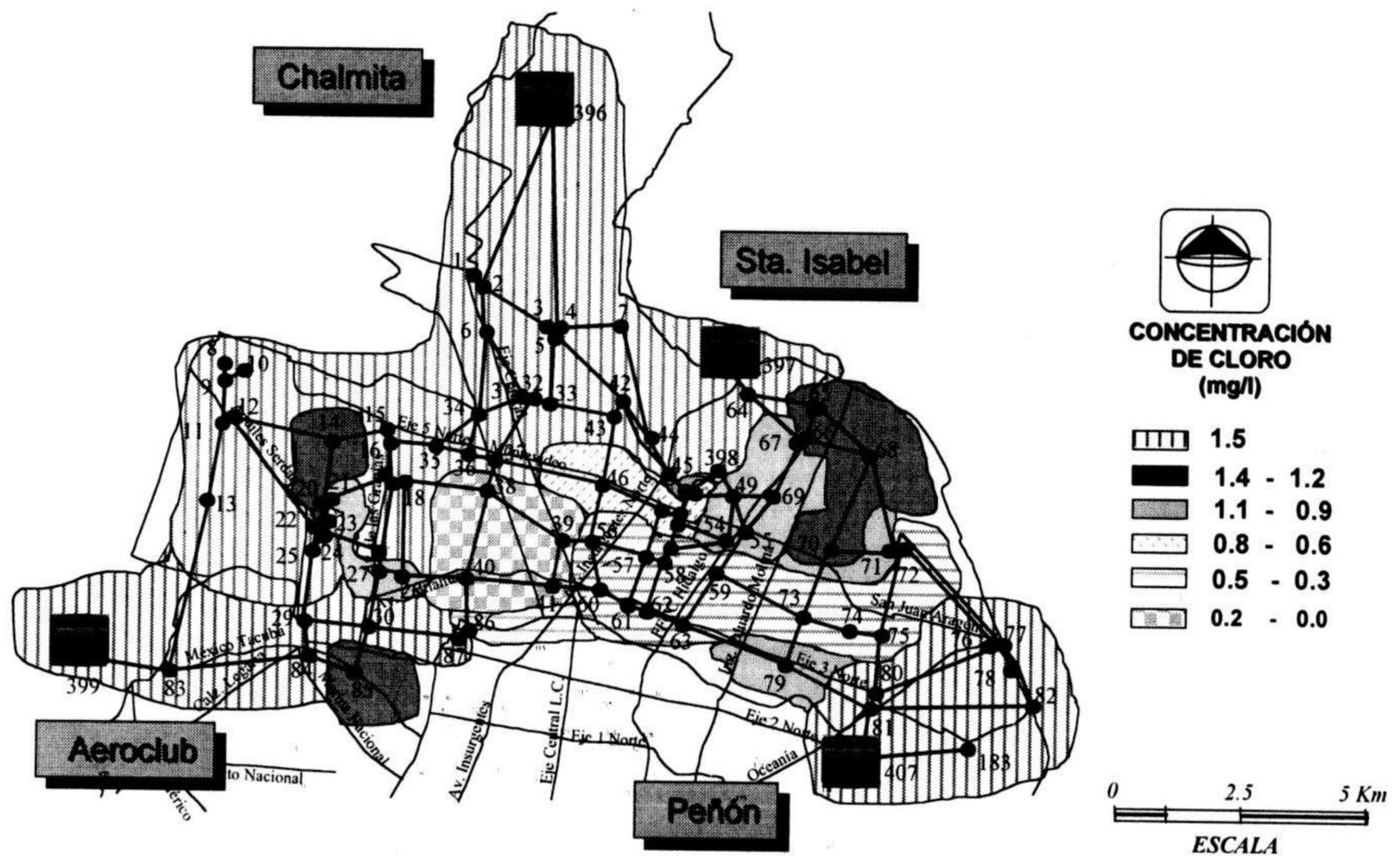


Figura 6. Zonas de la red con diferente concentración de cloro.

6. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA VALIDAR EL MODELO NUMÉRICO

Para verificar la bondad del modelo matemático fue necesario simular el movimiento del agua en una red de tuberías. El dispositivo de ensayos se construyó en las instalaciones del Instituto de Ingeniería, figura 7.

6.1 Dispositivo físico en el laboratorio

La red consta de una tubería de cobre de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, con una serie de válvulas que permiten extraer un gasto que simula la demanda en la red, fotografía 1.

La red tiene cuatro circuitos que abarcan un área total de 226.60 m². Cuenta con 3 tuberías de 11 m de largo y 3 de 9.6 m de longitud. Las tuberías de 11 m de largo se dividieron en cuatro tramos de 2.75 m y las de 9.60 m, en cuatro tramos de 2.4 m cada uno. En cada unión de tramo se colocó una llave de nariz de $\frac{1}{2}$ " por lo que se tienen 33 salidas de agua.

La altura del nivel de piso al eje de las tuberías de la red es de 1.80 m de altura.

El dispositivo de ensayos cuenta con pequeñas canaletas cuya finalidad es conducir el agua que sale por las llaves de nariz hacia el cárcamo para su recirculación o bien al drenaje cuando el agua está mezclada con el trazador en uso, fotografía 2.

Para el diseño de las canaletas se consideró un gasto por llave de 2 l/s. Este gasto es superior al máximo esperado en funcionamiento (1.2 l/s en promedio). La pendiente de 0.006 para ajustarse a la diferencia de nivel entre la red y el tanque del vertedor; además se condicionó a que el régimen del flujo dentro de las canaletas fuera siempre subcrítico.

La red es alimentada por la bomba No.1 de 1½ H.P. que extrae agua del tanque No.1 que se encuentra colocado a nivel de piso, fotografía 3.

El tanque No.2 destinado para la sustancia trazadora, es un tinaco de 1,100 litros de capacidad, colocado a una altura del piso de 1.20 m. La sustancia es suministrada hacia la red mediante la bomba No. 2 de 1½ H.P. La configuración del dispositivo físico se aprecia en la fotografía 4.

En el dispositivo físico se realizaron varias pruebas con el propósito de conocer la concentración de cloruro de sodio (NaCl) en los nudos de la red. Esta sustancia fue elegida por su capacidad de conductividad para medir su concentración, por no ser dañina y por su bajo costo.

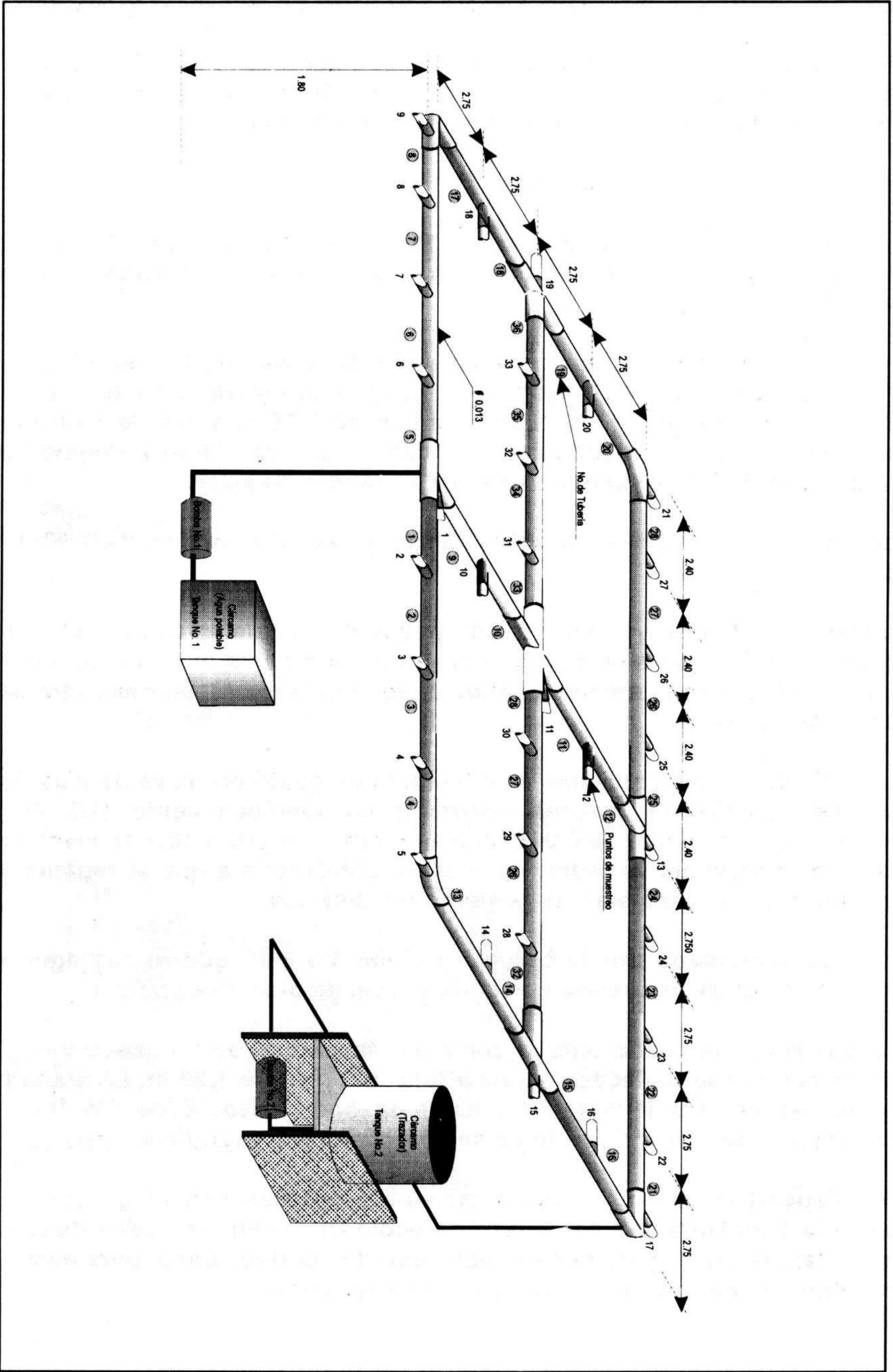
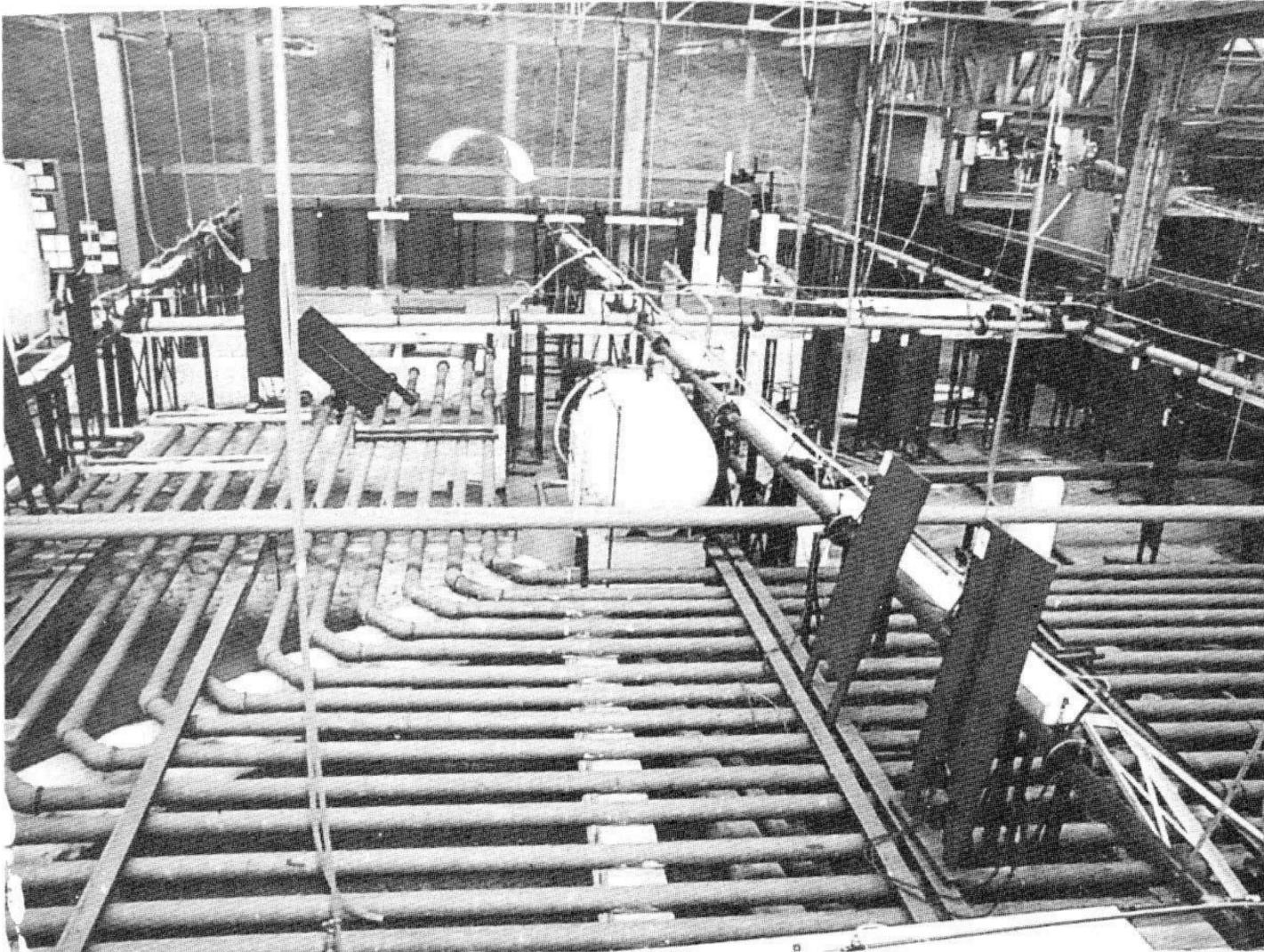
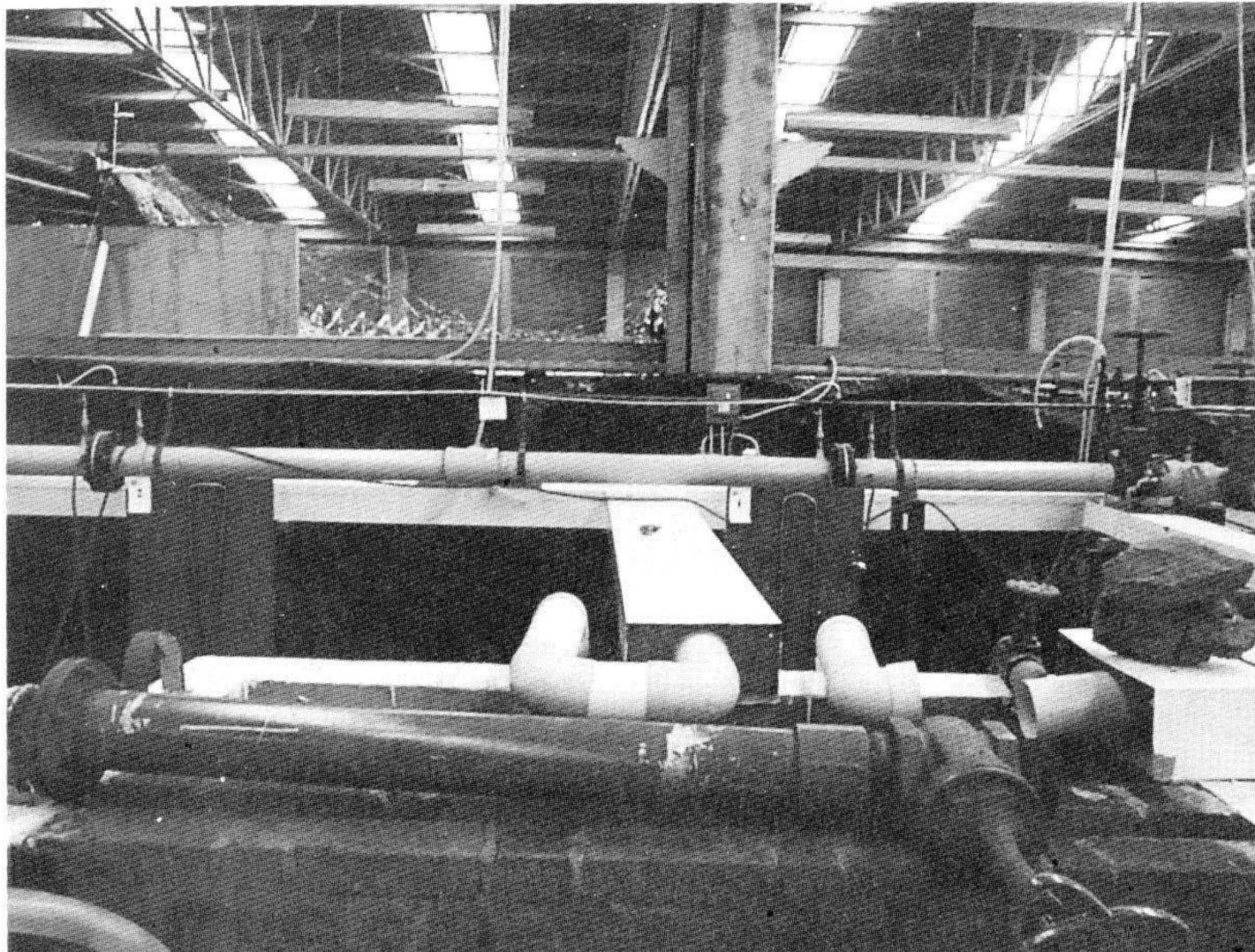


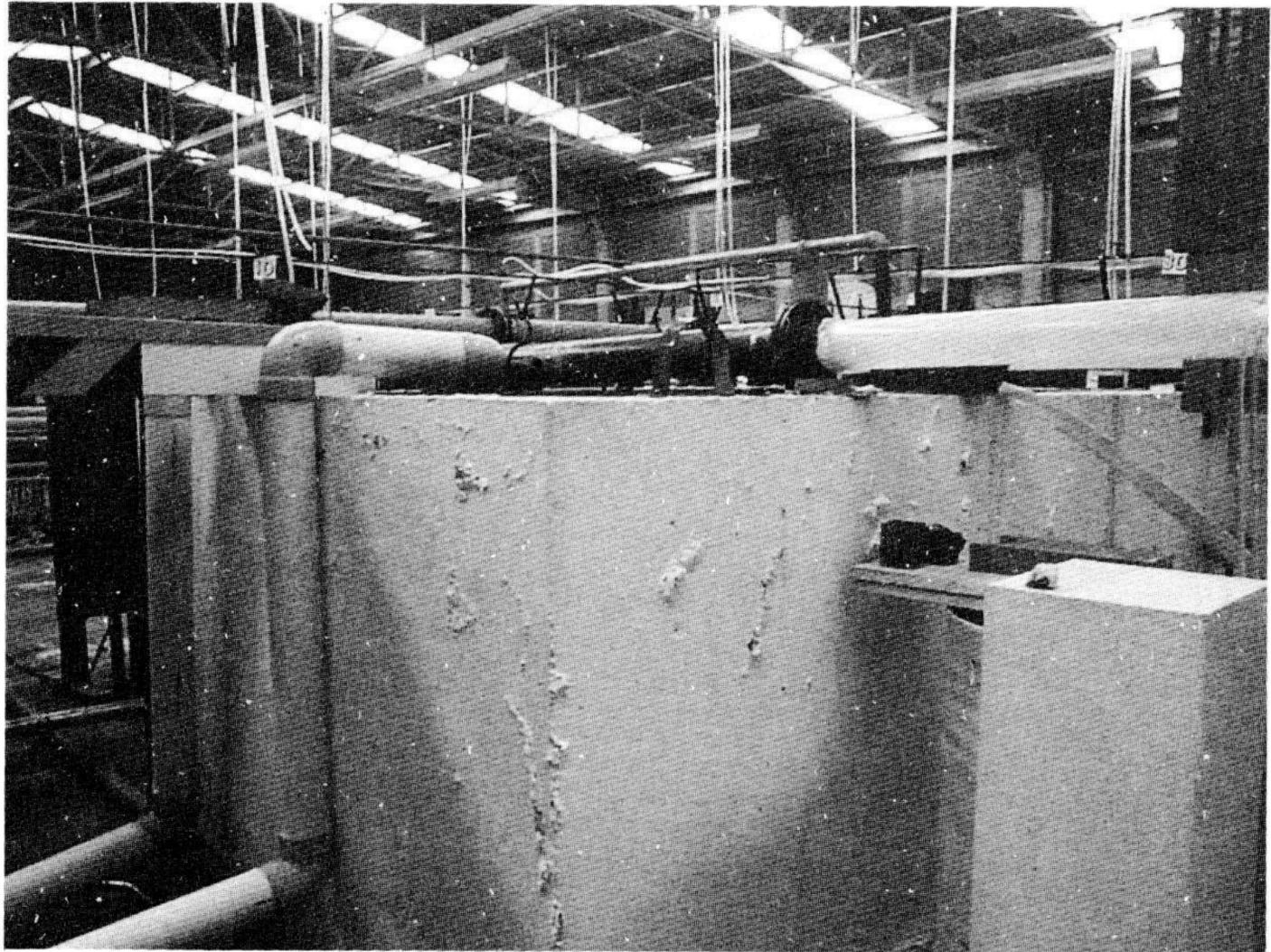
Figura 7. Dispositivo físico



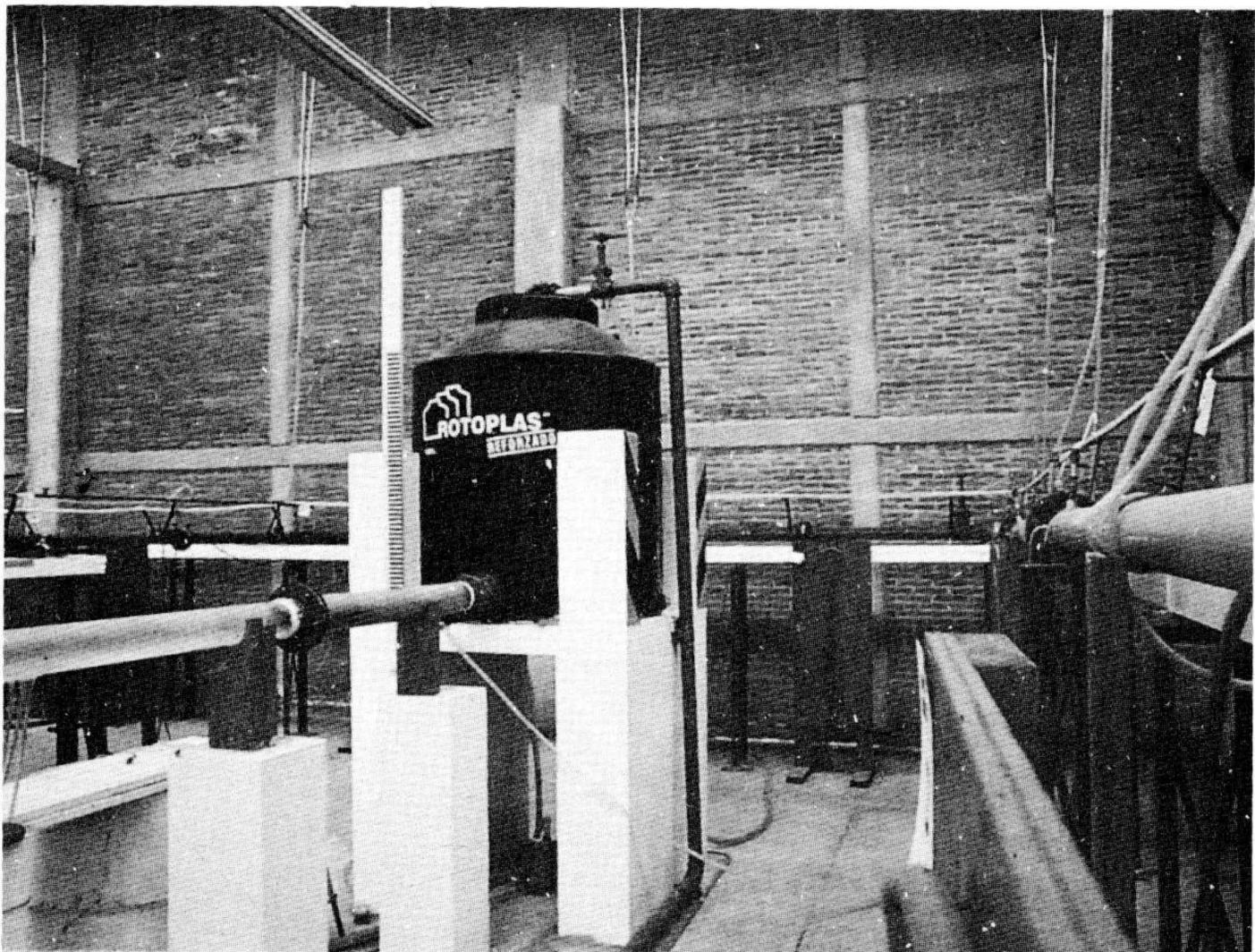
Fotografía 1. Red de tuberías instalada en el laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería



Fotografía 2. Canaletas que conducen el agua hacia el cárcamo o drenaje según el fin del uso.



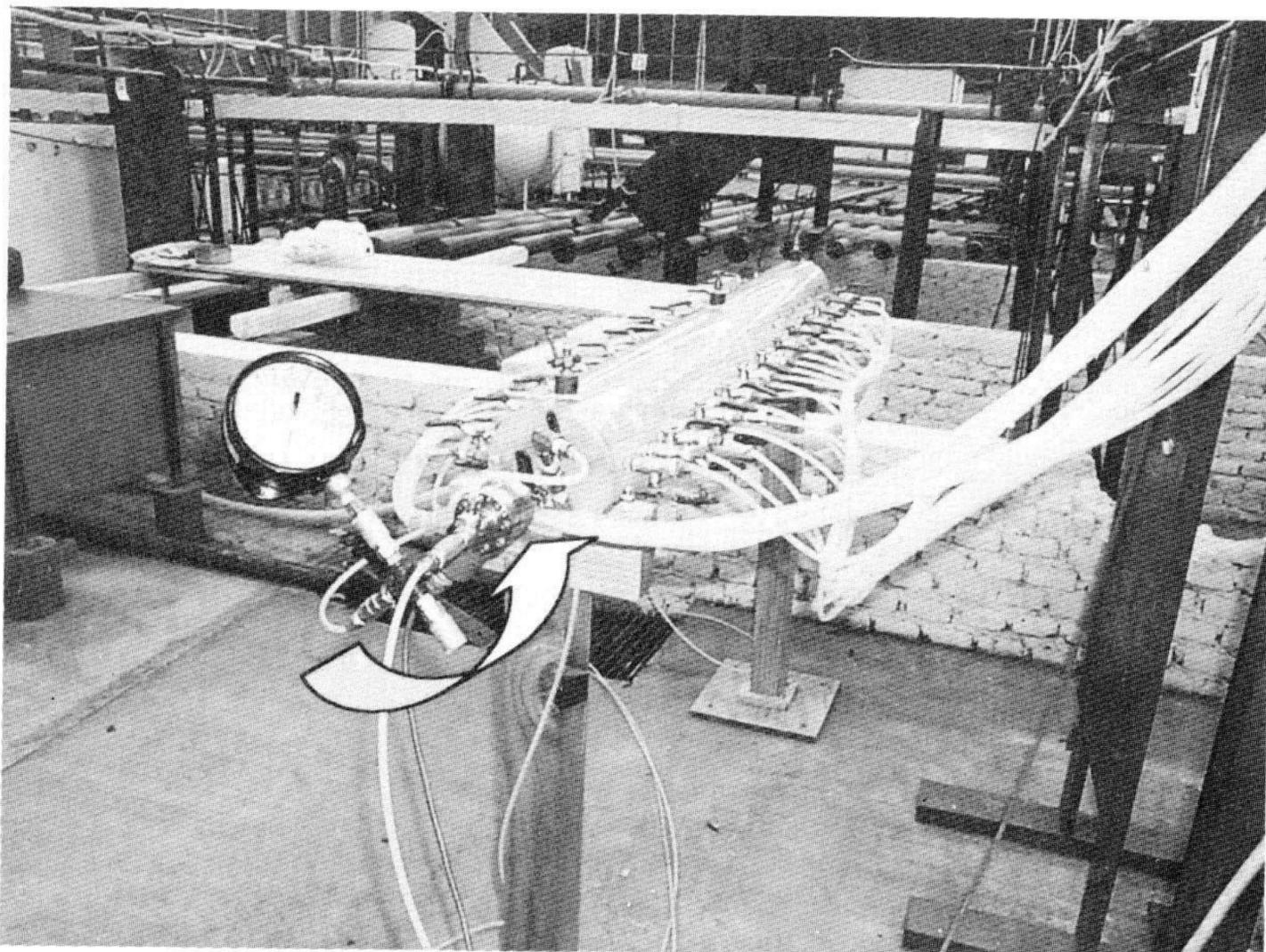
Fotografía 3. Tanque No.1 que alimenta de agua potable a la red de tuberías.



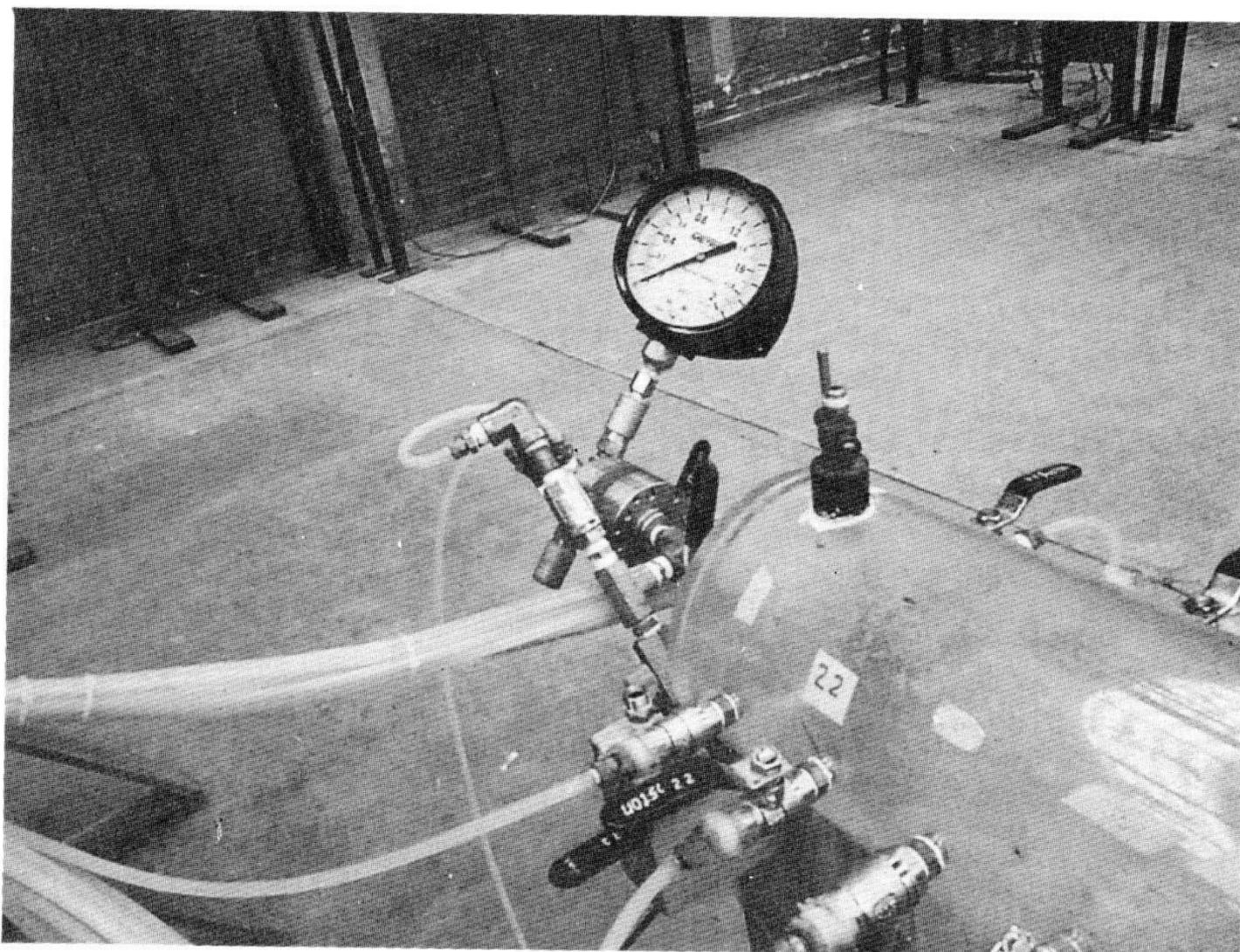
Fotografía 4. Tanque No.2 con la sustancia trazadora que alimenta la red.

Una vez conocida la sustancia con que se trabajará se procede a realizar el muestreo simultáneamente a la secuencia de pasos a seguir para obtener los gastos y presiones.

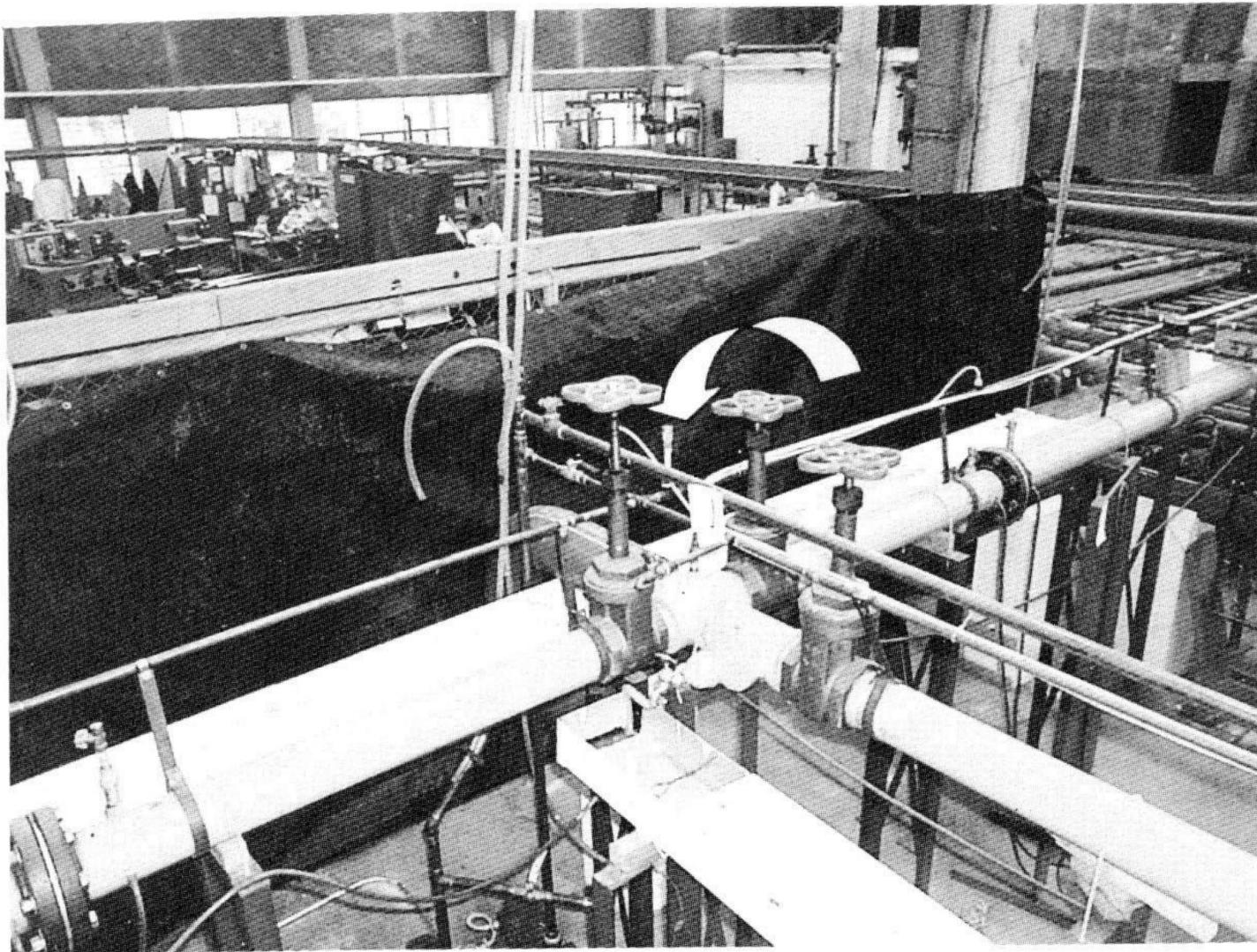
1. En el primer paso, las 33 llaves de nariz se colocan a una cierta abertura fija, que corresponde en ocasiones al 25% ó 50% del total.
2. Se coloca el trazador elegido (NaCl) en el tanque No. 2.
3. Se determinan las presiones y gastos que se presentan en cada una de las entradas y salidas de la red. Estos datos se obtienen en el instante en que se realiza el muestreo. Para realizar las mediciones de presión durante las pruebas en el dispositivo físico, se usaron los transductores de presión que permiten registrar presiones muy pequeñas, del orden de 0.01 m.c.a. y los manómetros de carátula, ellos conectados a un múltiple, dispositivo en el cual llegan todas las conexiones de los diferentes puntos de muestreo, fotografías 5, 6, 7 y 8.
4. El dispositivo comienza su funcionamiento, la red es alimentada por el tanque No. 1 en el nudo 1 y por el tanque No. 2 en el nudo 17, éste último con la sustancia trazadora.
5. Se establece una presión de entrada con la válvula de compuerta ubicada después de la bomba No.1, la cual depende del orden del gasto que se desee manejar.
6. Se espera a establecer el flujo en toda la red, abastecida por los dos tanques. Este tiempo es aproximadamente de 3 a 5 minutos.
7. Una vez establecido el flujo se realiza la primera muestra por cada llave de nariz, en un frasco de un litro de capacidad. Cada frasco es llenado en un lapso del orden de 10 segundos.
8. Transcurridos tres minutos se toma una segunda muestra, y así sucesivamente hasta tomar las 5 muestras, ver fotografía 9.
9. Para conocer la concentración de cloruro de sodio se utilizó un conductímetro y se infirió la concentración de cada muestra, ver fotografía 10.
10. Se miden los volúmenes de cada muestra y se obtiene su gasto. Los gastos de salida de cada llave de nariz, se obtuvieron con aforos volumétricos, para ello se empleó una probeta para medir el flujo de cada muestra, considerando el tiempo de muestreo.



Fotografía 5. Transductor de presión conectado al múltiple.



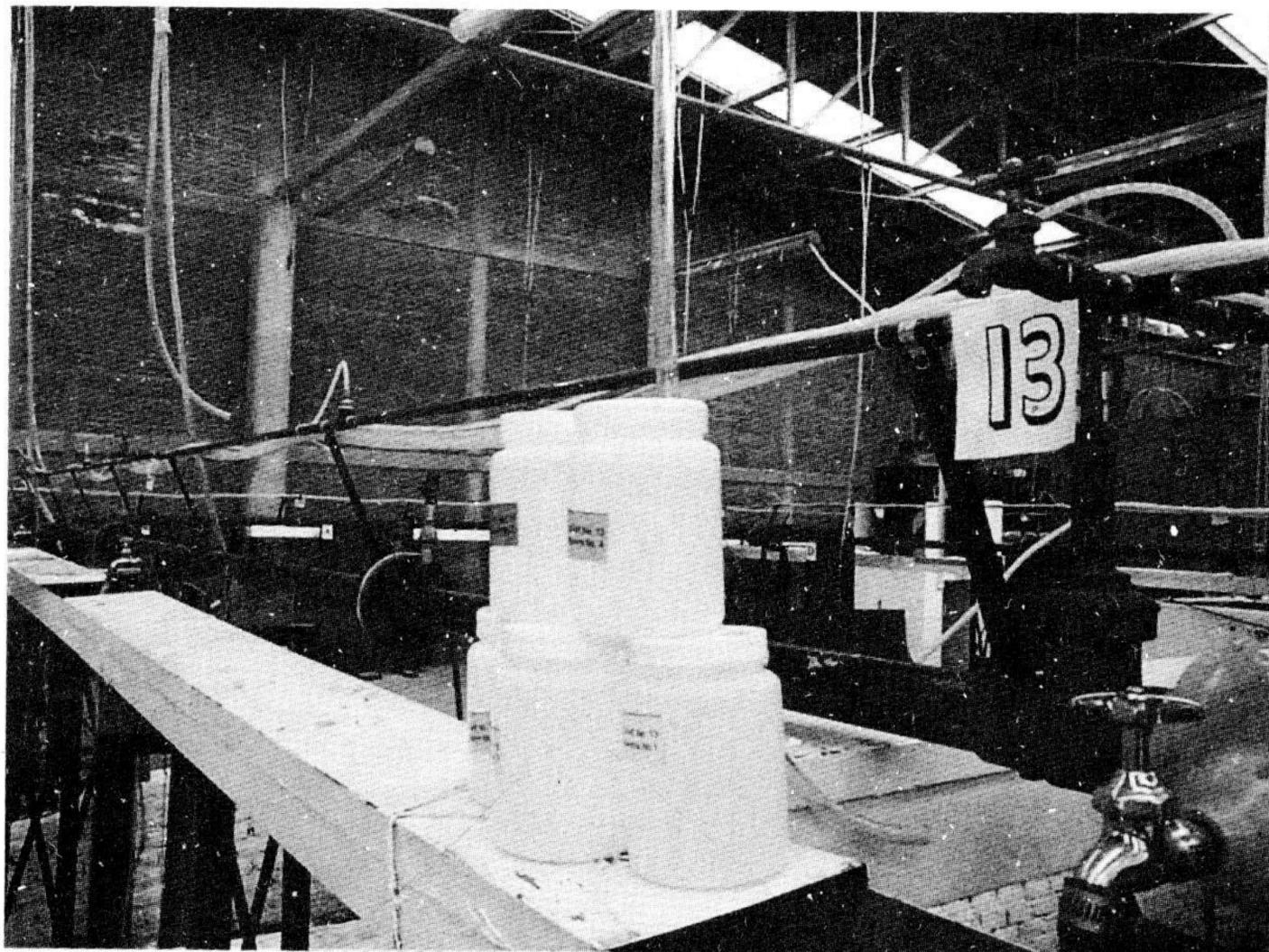
Fotografía 6. Manómetro de carátula.



Fotografía 7. Preparación para la conexión de una celda absoluta o manómetro de carátula.



Fotografía 8. Diferentes nudos de toma de presión conectados a la celda diferencial.



Fotografía 9. Muestreo en el laboratorio de hidráulica.



Fotografía 10. Conductividad de cada muestra.

6.2 Análisis de resultados

En las tablas 2, 3 y 4 se aprecia el volumen, gasto, conductividad y concentración de cada uno de los puntos muestreados. Se tomaron cinco muestras de cada llave para obtener un mejor registro de lectura.

Para obtener los resultados con el modelo numérico, fue necesario alimentar el programa con datos como la carga en los nudos de entrada (tanque No. 1 $Q = 0.47$ l/s y tanque No. 2 $Q = 0.56$ l/s), los gastos de extracción de cada llave de nariz y las características geométricas del dispositivo como la longitud, diámetro y coeficiente de fricción (valor medio y los obtenidos previamente en pruebas experimentales), tabla 5.

En la figura 8 se aprecia las presiones (m.c.a) registradas experimentalmente en cada nudo, (solo se tomaron en los nueve cruces de la red y las calculadas con el modelo estático).

Se observa en la figura 8 con ayuda de las presiones experimentales y calculadas matemáticamente, que el flujo con la sustancia trazadora se condujo del nudo 17 al 13 posteriormente se dirigió hacia el nudo 21 terminando en el 19 y 9. Por el lado derecho del nudo 17 el flujo se condujo hacia el nudo 15 terminado en el nudo 5. Del nudo 13 pasó al nudo 11.

En cuanto al flujo de agua potable derivada del tanque No.1 se aprecia que su dirección fue por el lado derecho hacia el nudo 5. Por la parte de arriba hacia el nudo 11 dirigiéndose luego al 15 por la derecha y al nudo 19 y 9 por el lado izquierdo. Por la parte izquierda del nudo 1 su recorrido fue hacia el nudo 9.

Se observa que la dirección del flujo es la esperada a simple vista de acuerdo a las presiones de entrada por ambos tanques, además los datos son muy parecidos y su error relativo oscila en un 5 %, como lo muestra la gráfica 1, donde el punto más alejado a la recta es el No. 5, siendo su presión medida de 0.69 m.c.a. y la calculada de 0.8 m.c.a.

En cuanto a la concentración obtenida experimental y teóricamente, se observa en la figura 9 que los valores son semejantes, siguiendo un descenso en la dirección del flujo realizado desde el nudo 17, que al entrar en combinación con el agua potable dirigido del tanque No. 1 por el nudo 1, disminuye su concentración hasta valores nulos al acercarse a este nudo.

Lo que indica que el modelo matemático que simula la propagación de una sustancia en el agua que fluye en una red de tuberías durante un día es confiable. El método constituye una importante herramienta de trabajo para determinar la forma en que se distribuye el agua en una red de tuberías que es abastecida a partir de varios tanques e imponer las condiciones de

operación de válvulas, así como determinar los puntos donde se debe suministrar nuevamente cloro en el caso de mantener la calidad del agua.

Tabla 2. Resultados de volúmenes obtenidos en el muestreo de laboratorio.



Análisis del muestreo de difusión de sustancias

Fecha del muestreo: 19 nov' 98.
 Sustancia: Cloruro de sodio, (NaCl)
 Modelo físico: Red de agua potable
 Ubicación: Laboratorio de Hidromecánica

Llave	Presión (Kg/cm ²)	Volumen M1 (l)	Volumen M2 (l)	Volumen M3 (l)	Volumen M4 (l)	Volumen M5 (l)
Tanque No. 1	0.13	0.7	0.50	0.26	0.027542373	0.25
3		1.2	0.85	0.625	0.65	0.7
5	0.05	0.91	0.72	0.51	0.49	0.54
6		0.5	0.38	0.23	0.23	0.24
7		0.83	0.63	0.41	0.4	0.415
8		1.2	0.91	0.63	0.62	0.61
9	0.0625	1.2	0.86	0.655	0.66	0.7
11	0.11	0.815	0.63	0.415	0.405	0.435
13	0.15	1.5	1.2	0.92	0.91	0.965
15	0.0875	1.12	0.825	0.635	0.64	0.68
Tanque No. 2	0.15	Se eliminó	0.61	0.53	0.53	0.53
19	0.0875	0.635	0.5	0.31	0.35	0.32
21	0.0875	0.52	0.4	0.27	0.26	0.28
22		1.15	0.89	0.78	0.725	0.72
23		0.36	0.27	0.24	0.21	0.22
26		0.51	0.39	0.295	0.28	0.28
27		0.75	0.55	0.4	0.39	0.4
29		0.875	0.68	0.535	0.5	0.5
32		0.51	0.39	0.31	0.289	0.25
33		1.129	0.72	0.625	0.61	0.65

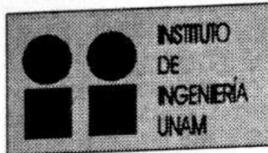
Algunos datos adicionales:

Presión en la llave No. 1 (Bombeo de agua limpia): 0.13 kg/cm²

Presión en la llave No. 17 (Bombeo del trazador): 0.150 kg/cm²

Concentración en el tinaco: 100 %

Tabla 3. Resultados de gastos obtenidos en el muestreo de laboratorio



Análisis del muestreo de difusión de sustancias

Fecha del muestreo: 19 nov '98.
 Sustancia: Cloruro de sodio, (NaCl)
 Modelo físico: Red de agua potable
 Ubicación: Laboratorio de Hidromecánica

Llave	Presión (Kg/cm ²)	t = 16:072s	t = 11:52 s	t = 10:03 s	t = 9:44 s	t = 9:44 s	Q T (l/s)
		Q 1 (l/s)	Q 2 (l/s)	Q 3 (l/s)	Q 4 (l/s)	Q 5 (l/s)	
Tanque	0.13	0.473124115					
Rotoplas	0.15	0.545912441					
1	0.13	0.043554007	0.043402778	0.025922233	0.002917624	0.026483051	0.02845594
3		0.074664012	0.073784722	0.062313061	0.068855932	0.074152542	0.07075405
5	0.05	0.056620209	0.0625	0.050847458	0.05190678	0.05720339	0.05581557
6		0.031110005	0.032986111	0.022931206	0.024364407	0.025423729	0.02736309
7		0.051642608	0.0546875	0.040877368	0.042372881	0.043961864	0.04670844
8		0.074664012	0.078993056	0.062811565	0.065677966	0.064618644	0.06935305
9	0.0625	0.074664012	0.074652778	0.065304088	0.069915254	0.074152542	0.07173773
11	0.11	0.050709308	0.0546875	0.041375872	0.042902542	0.046080508	0.04715115
13	0.15	0.093330015	0.104166667	0.091724826	0.096398305	0.102224576	0.09756888
15	0.0875	0.069686411	0.071614583	0.06331007	0.06779661	0.072033898	0.06888831
17	0.15		0.052951389	0.052841476	0.056144068	0.056144068	0.05452025
19	0.0875	0.039509706	0.043402778	0.030907278	0.037076271	0.033898305	0.03695887
21	0.0875	0.032354405	0.034722222	0.026919242	0.027542373	0.029661017	0.03023985
22		0.071553011	0.077256944	0.0777667	0.076800847	0.076271186	0.07592974
23		0.022399204	0.0234375	0.023928215	0.022245763	0.023305085	0.02306315
26		0.031732205	0.033854167	0.029411765	0.029661017	0.029661017	0.03086403
27		0.046665007	0.047743056	0.039880359	0.041313559	0.042372881	0.04359497
29		0.054442509	0.059027778	0.05333998	0.052966102	0.052966102	0.05454849
32		0.031732205	0.033854167	0.030907278	0.030614407	0.026483051	0.03071822
33		0.070246391	0.0625	0.062313061	0.064618644	0.068855932	0.06570681

Q T 1.02994061

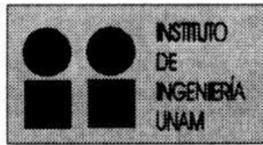
Algunos datos adicionales:

Presión en la llave No. 1 (Bombeo de agua limpia): 0.13 kg/cm²

Presión en la llave No. 17 (Bombeo del trazador): 0.150 kg/cm²

Concentración en el tinaco: 100 %

Tabla 4. Resultados de conductividad y concentración obtenidos en el muestreo de laboratorio.



Análisis del muestreo de difusión de sustancias

Fecha del muestreo: 19 nov 98.

Sustancia: Cloruro de sodio, (NaCl)

Modelo físico: Red de agua potable

Ubicación: Laboratorio de Hidromecánica

Llave	Conductividad M_1	Conductividad M_2	Conductividad M_3	Conductividad M_4	Conductividad M_5	Conductividad Total	Concentración (%)
Tanque No.1	70	70	70	70	70	70	0.000
3	125	125	121	118	110	119.8	0.166
5	357	355	354	352	355	354.6	0.949
6	70	70	70	72	70	70.4	0.001
7	70	70	71	72	70	70.6	0.002
8	70	70	70	74	70	70.8	0.003
9	106	107	109	111	108	108.2	0.127
11	102	107	104	102	103	103.6	0.112
13	347	345	334	343	349	343.6	0.912
15	360	352	360	360	360	358.4	0.961
Tanque No.2	370	370	371	370	367	369.6	0.999
19	321	321	316	314	312	316.8	0.823
21	338	339	342	340	340	339.8	0.899
22	350	349	345	347	348	347.8	0.926
23	348	342	345	340	345	344	0.913
26	343	340	343	345	344	343	0.910
27	343	340	343	345	343	342.8	0.909
29	350	349	336	345	341	344.2	0.914
32	102	93	103	92	109	99.8	0.099
33	102	95	102	102	102	100.6	0.102

Algunos datos adicionales:

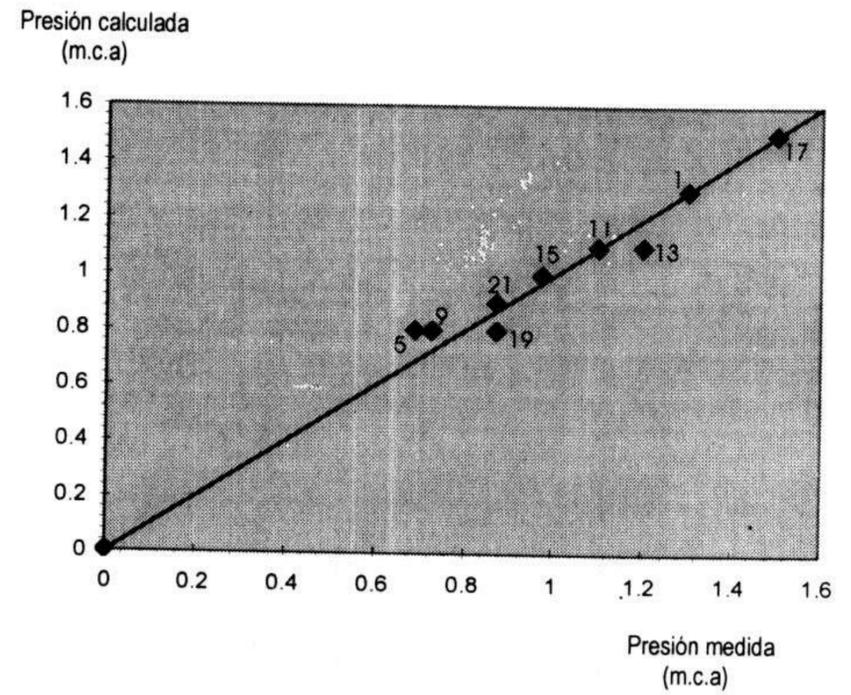
Presión en la llave No. 1 (Bombeo de agua limpia): 0.13 kg/cm²

Presión en la llave No. 17 (Bombeo del trazador): 0.150 kg/cm²

Concentración en el tinaco: 100 %

Tabla 6. Presión medida y calculada en cada nudo de la red.

Nudo	Presión medida (m.c.a.)	Presión calculada (m.c.a.)
1	1.3	1.3
5	0.69	0.8
9	0.725	0.8
11	1.1	1.1
13	1.2	1.1
15	0.975	1
17	1.5	1.5
19	0.874	0.8
21	0.875	0.9



Gráfica 1. Presión medida y calculada en cada nudo de la red.

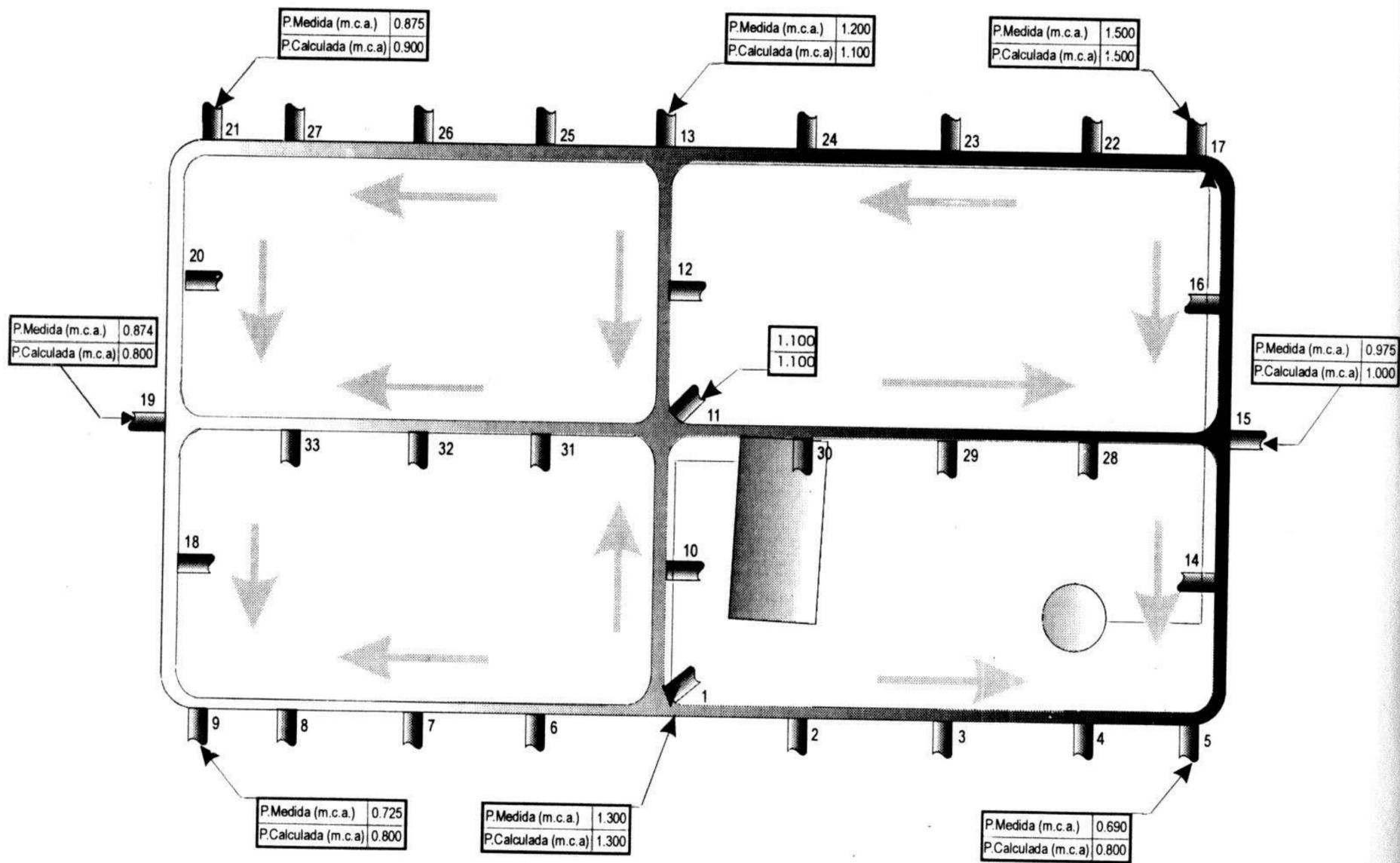


Figura 8. Presión medida y calculada en cada nudo de la red.

Tabla 7. Concentración medida y calculada en cada nudo de la red.

Llave	C. Medida	C. Calculada
1	0.000	0.000
3	0.166	0.000
5	0.949	0.759
6	0.001	0.000
7	0.002	0.000
8	0.003	0.000
9	0.127	0.000
11	0.112	0.169
13	0.912	1.000
15	0.961	0.999
17	0.999	1.000
19	0.823	0.587
21	0.899	0.999
22	0.926	1.000
23	0.913	1.000
26	0.910	0.999
27	0.909	0.999
29	0.914	0.637
32	0.099	0.169
33	0.102	0.340

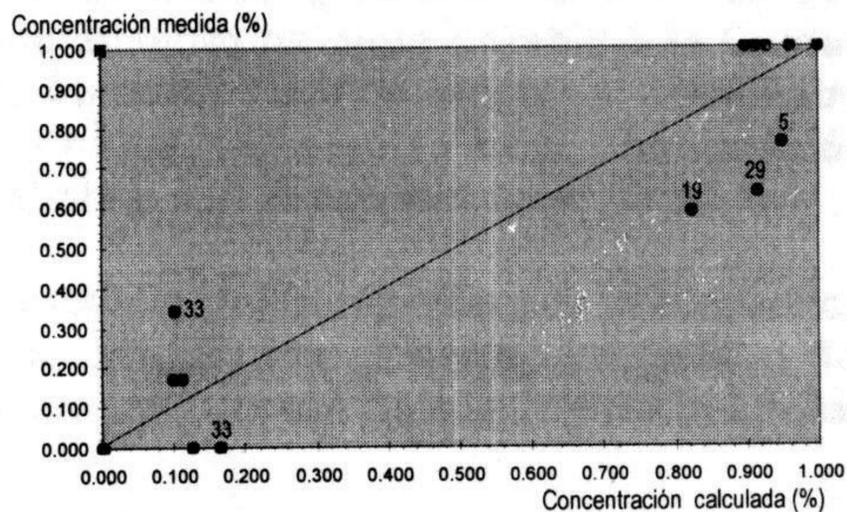


Figura 2. Error entre la concentración medida y calculada en cada llave de la red.

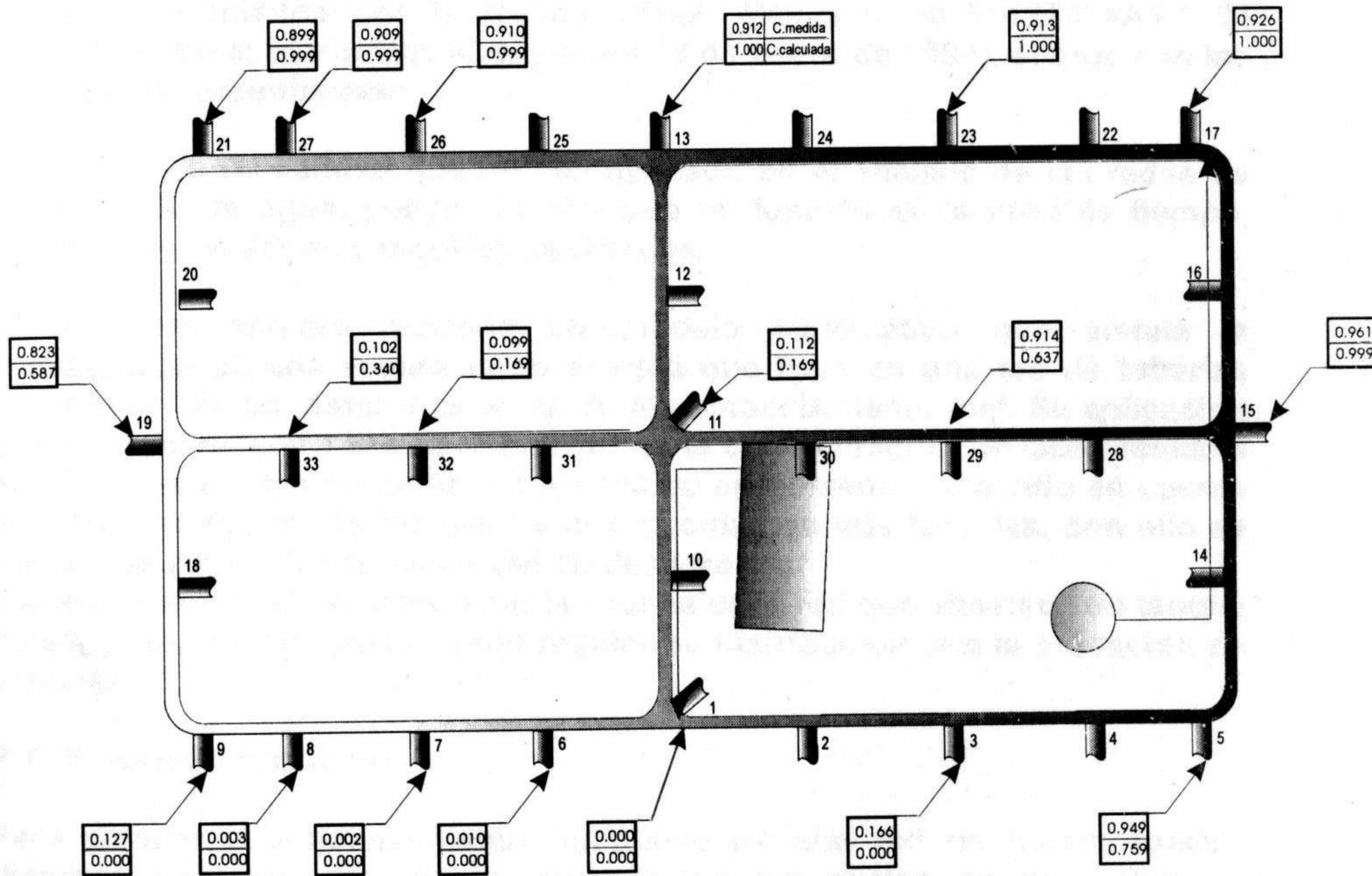


Figura 9. Concentración medida y calculada de la sustancia trazadora en cada punto muestreado.



7. CONCLUSIONES

Hoy en día la investigación debe estar enfocada a resolver problemas que presenta nuestra comunidad. El abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México requiere ser continuamente atendido para no afectar el suministro del agua a los usuarios, en la cantidad suficiente, con una presión conveniente en cualquier momento del día y con la calidad adecuada.

El control de la calidad del agua y el análisis del comportamiento hidráulico de las redes deben ser dos campos de estudio simultáneos. La calidad del agua cambia durante su recorrido, desde las fuentes de suministro hasta los puntos de consumo.

Durante el tiempo que el agua permanece en la red, las sustancias más reactivas contenidas en la misma, como por ejemplo el cloro utilizado como desinfectante, reaccionan o se combinan con otras sustancias presentes en el agua o adheridas a las paredes de las tuberías. En el caso de los desinfectantes, su concentración disminuye a través de la red favoreciendo el crecimiento bacteriológico, con el consiguiente riesgo sanitario si no se garantiza una concentración mínima de cloro.

En México, los parámetros de calidad que debe cumplir el agua potable, están determinados por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SAA1-1994 (publicada en el Diario Oficial, el jueves 18 de enero de 1996), acorde con las directrices comunitarias.

Los modelos de calidad que se han aplicado en el análisis de las redes de distribución de agua, pueden clasificarse en función de la variable tiempo, en modelos estáticos y modelos dinámicos.

El presente estudio propone un modelo matemático que simula la propagación de una sustancia en el agua que fluye en una red de tuberías durante un día por estar más apegado al comportamiento real. Su aplicación principal se refiere a la determinación de la concentración de cloro residual en distintos puntos de dicha red en cualquier momento, tomando en cuenta el cambio temporal de los gastos que circulan en sus tuberías, con ello se ubican las zonas donde existe déficit de cloro.

También hace posible determinar las zonas de la red que abastece un tanque de almacenamiento, permitiendo regular su distribución con la operación de válvulas.

7.1 Métodos propuestos

Para simular el funcionamiento hidráulico de una red de tubos, existen diversos métodos de cálculo, algunos de los cuales se presentan en paquetes muy atractivos. Los modelos utilizados en este estudio fueron elaborados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, y consideran la

variación de la demanda en el tiempo y el efecto de la variación de niveles en los tanques, así como el paro y arranque de bombas. La simulación del flujo en la red permite conocer sus presiones, gastos que circularan en ella y cargas sobre el terreno, en cada nudo.

Con la información anterior se procede a calcular la concentración en cada nudo de la red, para lo cual primero se determina la variación de la concentración a lo largo de cada una de las tuberías que conforman la red.

Para conocer la concentración a lo largo de una tubería se utilizó el esquema numérico de flujo corregido, que resuelve la ecuación de la variación de la concentración a través del tiempo, en la cual sólo se consideró al transporte por convección y su reacción del agua con la sustancia, la solución analítica de esta ecuación es complicada y en ocasiones las condiciones de frontera la hacen imposible de valuar, por ello se ha recurrido a este método numérico para resolverla. El principio fundamental del esquema de flujo corregido es la combinación de un esquema de orden alto con uno de orden bajo, donde los errores que presenta uno, son suprimidos por el otro y viceversa, así se obtiene finalmente la solución para ese intervalo de tiempo mezclando los resultados de ambos cálculos.

Una vez conocido el avance de la concentración a través de cada tubería de la red y con la concentración en los extremos, se realizó el balance de concentración en cada nudo, considerando si el gasto en un tubo sale o llega al nudo.

De esta manera se infiere la calidad de agua que se presenta en cualquier punto de la red.

El método constituye una importante herramienta de trabajo para determinar la forma en que se distribuye el agua en una red de tuberías que es abastecida a partir de varios tanques y proponer las condiciones de operación de válvulas, así como determinar los puntos donde se debe suministrar nuevamente cloro para garantizar su calidad.

7.2 Dispositivo físico

Para verificar la bondad del modelo matemático fue necesario simular el movimiento del agua potable en una red de tuberías. El dispositivo de ensayos se construyó en las instalaciones del Instituto de Ingeniería. Estas pruebas comprobaron la confiabilidad del uso del método matemático para ser aplicado en otros estudios como lo es conocer las zonas que abastece un tanque de regulación de agua potable, conocer la conducción de agua residual para realizar las maniobras necesarias para mejorar su distribución a zonas que lo requieran.

El cloruro de Sodio (NaCl) utilizado demostró ser un buen trazador para utilizarse en estudios posteriores debido a su bajo costo, a su buena conductividad para ser detectable su concentración, y los pocos daños de contaminación al entrar en contacto con otras sustancias.

La realización de un ensayo de esta naturaleza requiere de una preparación previa muy minuciosa, ya que la prueba resulta ser corta y las operaciones como la estabilidad del flujo, el muestreo, la lectura de presiones, deben ser rápidas y conocidas de antemano para asegurar el éxito de la prueba, además de que requiere de la sincronización de un buen número de personas.



8. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Biswas P., Lu Ch., Clark R., (1993). *A model for chlorine concentration decay*. Water Research, Vol 27, no. 12, pp. 1715-1724.
- 2) Clark, R. M., Grayman, W. M., Goodrich, J.A., Deininger, R. A., and Hess, A. F. (1991). *Field- testing distribution water quality models*. J.Am. Water Works Assoc., 83(Jul.), 67-75.
- 3) Clark R.M., Grayman W.M., Goodrich J.A., Deininger R.A., Skov K, (1991). *Mesuring and modeling Chlorine, Propagation in Water Distribution Systems*. J.Am. Water Works Assoc., 871- 887.
- 4) Clark, R. M., Grayman, W.M., Males, R.M., and Hess, A.F. (1993b). *Modeling contaminant propagation in drinking water distribution systems*. J. Envir. Engrg., ASCE, 119(2), 349-364.
- 5) Daily J., y Harleman D. (1975). *Dinámica de fluidos con aplicaciones en Ingeniería*, Edit. Trillas, México.
- 6) Jeppson, R. (1976). *Analysis of flow in pipe networks*. Ann arbor, mich.: Ann arbor science.
- 7) Nakamura, S. (1992). *Métodos numéricos aplicados con software*. Edit. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
- 8) Fuentes O., Sánchez J.L., (1991). *Actualización de un método para calcular redes de tuberías funcionando a presión en régimen permanente*. Revista de Ingeniería, Vol. LXI, U.N.A.M., México, octubre-diciembre .
- 9) Fuentes G., Fuentes O., (1992). *Funcionamiento hidráulico a presión en régimen no permanente de una red de tuberías*, Memorias de XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II, Cartagena, Colombia.
- 10) Sotelo G. (1987). *Hidráulica General*. Volúmen I, Fundamentos , Editorial Limusa, México, D.F.
- 11) Streeter V., Wylie B., (1984). *Mecánica de los fluidos*. Edit. Mc Graw Hill, Sexta edición, Universidad de Michigan.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Óscar Fuentes Mariles (Director de Tesis), con todo el respeto, cariño y admiración que ha despertado en mi su incansable labor.

Fundación ICA es una Asociación Civil Constituida conforme a las leyes mexicanas el 26 de octubre de 1986, como se hace constar en la escritura pública número 21,127 pasada ante la fe del Lic. Eduardo Flores Castro Altamirano, Notario Público número 33 de Distrito Federal, inscrita en el Registro Público de la Propiedad en la sección de Personas Morales Civiles Bajo folio 12,847. A fin de adecuar a las disposiciones legales vigentes los estatutos sociales, estos fueron modificados el 17 de octubre de 1994, como se hace constar en la escritura pública número 52,025 pasada ante la fe del Lic. Jorge A. Domínguez Martínez, Notario Público número 140 del Distrito Federal.

Fundación ICA es una institución científica y tecnológica inscrita en el Registro Nacional de Instituciones Científicas y Tecnológicas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, con el número 97/213 del 20 de junio de 1997.

Fundación ICA. Cuadernos FICA

Editor: Fernando O. Luna Rojas

Av. del Parque 91. Colonia Nápoles 03810 México, D.F.

Periodicidad bimestral

**Certificado de Reserva de Derechos de Autor de la SEP:
04 – 1999 – 031718492500 - 102**

Certificado de la Secretaría de Gobernación: en trámite

Registro del servicio Postal Mexicano: P. - PROV. – DF - 173 - 95

Esta edición de “Difusión de sustancias en redes de tuberías funcionando a presión y algunas aplicaciones” de Cecilia Chávez Zavala, se terminó en julio de 1999, se imprimieron 2,000 ejemplares, cada ejemplar consta de 43 páginas, fue impreso en Lago Garda No. 100 bis, Colonia Anahuac, CP 11320 México, D.F. La edición estuvo al cuidado Fernando O. Luna Rojas.

Comités del programa de becas de licenciatura en Ingeniería Civil.

Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Ing. Gerardo Ferrando Bravo
M. en I. Gabriel Moreno Pecero
M. en C. Salvador Landeros Ayala
Ing. Gilberto Sotelo Ávila
Ing. José Gaya Prado
Ing. Enrique César Valdés
Ing. Enrique Jiménez Espriú

Facultad de Ingeniería de la UAEM.

Ing. Ángel Albiter Rodríguez
Ing. Raúl Vera Noguel
Ing. Francisco Becerril Vilchis
Ing. Horacio Ramírez de Alba

División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAM Azcapozalco.

Dr. Mario Alberto Romero Romo
Dr. Amador Terán Gilmore
Ing. Luis Antonio Rocha Chiu
Ing. Dante A. Alcántara García
Ing. Darío Guaycochea Guglielmi

Facultad de Ingeniería de la UAQuerétaro.

M. en I. José de Jesús Hernández Espino
Ing. Gerardo René Serrano Gutiérrez
Ing. Jorge Martínez Carrillo

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Zacatenco, IPN.

M. en C. Pino Durán Escamilla
Ing. Felipe Marquez Quintero
Ing. Jorge Heinen Treviño
Arq. Rogelio Uriza Salgado

Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNHgo.

Ing. Ernesto A. Núñez Aguilar
Ing. David Hernández Hueramo
Ing. José Muñoz Chávez
Ing. Daniel Durand Flores

Facultad de Química de la UNAM

Dr. Enrique Bazúa Rueda
I. Q. Mayo Martínez Kahn
I. Q. Federico Galdeano Bienzobas
I. Q. Leticia Lozano Ríos
Q. Pilar Montagut Alvarado