



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA.

T E S I S

SISTEMA DE DESINFECCIÓN SECUNDARIA UTILIZANDO
HIPOCLORITO DE SODIO (POSTCLORACIÓN) PARA LA
RED DE AGUA POTABLE DE CIUDAD UNIVERSITARIA.

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERA QUÍMICA.**

P R E S E N T A:

MARÍA TERESA VALERIANO GONZÁLEZ.



MÉXICO, D.F.

2011.



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dr. Mariano Pérez Camacho

VOCAL: Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

SECRETARIO: Dr. Ignacio Monje Ramírez

1er SUPLENTE: Dra. María Rafaela Gutiérrez Lara

2° SUPLENTE: Dr. Alfonso Durán Moreno

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Instituto de Ingeniería de la UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Ignacio Monje Ramírez.

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dra. María Teresa Orta Ledesma.

SUSTENTANTE:

María Teresa Valeriano González.

Agradecimientos

A Dios por permitirme llegar a este punto de mi vida, por permitirme disfrutar de mi familia, mi novio, mis amigos, mis compañeros y mis profesores, que me han brindado su compañía, sus alegrías, sus tristezas, en pocas palabras su vida.

A mis padres Esther González y Guillermo Valeriano, por siempre brindarme su apoyo incondicional, por enseñarme que la vida tiene diferentes matices, por mostrarme que todo tiene una solución, por hacer de mí una gran persona, por convertirse en mis mejores amigos, por todos los sacrificios realizados, por todos los buenos consejos y regaños tan oportunos, por compartir su vida conmigo, pero sobre todo por llenarnos de amor a mi hermanos y a mí. Me faltan palabras para describir todo lo que siento por ustedes, lo único que les puedo decir es que los Amo.

A mis hermanos Miguel Ángel y Guillermo Javier, por su compañía incondicional siempre que los necesite, por su apoyo en tantas batallas, por tantas carcajadas compartidas, por ser los mejores cómplices, por soportar tantos cambios de humor, pero sobre todo por siempre cuidar a su hermanita. Los amo.

A Guillermo Guerreo por ser siempre incondicional, por todos los buenos momentos, por siempre tener las palabras exactas, por quererme tanto como yo lo quiero a él.

A mis amigos de toda la vida Dianis, Xany, Fabiola, Elena, Rodolfo, Mariano, Arnoldo y Edgar, por convertirse en mi familia durante tantos años, por llegar en el momento indicado, por compartir su vida conmigo, por dejarme aprender de ellos, pero sobre todo por hacerme tan feliz. En verdad no se que hubiera sido de mí sin su grata amistad, los quiero mucho.

A Dianis por que en muy poco tiempo te has convertido en mi mejor compañera, pero sobre todo en mi mejor amiga, por que espero seguir compartiendo nuestros sueños. Te quiero...

A mis compañeros del cubículo 410 del Instituto de Ingeniería que fueron los verdaderos testigos de la realización de este trabajo, a Karen, Priscila, Marie, Betty, Adriana, Fernando, Germán, Erick, Alberto, Carlos, Iván, Gabriel y como olvidar a Raúl.

A la M. en C. Isaura Yáñez Noguez por brindarme la primera oportunidad de integrarme a un proyecto, por su buena disposición, por su apoyo incondicional, pero sobre todo por brindarme su amistad.

Al Dr. Ignacio Monje Ramírez por aceptar guiar mi trabajo de tesis, por el apoyo y tiempo dedicados a este trabajo, por sus comentarios y concejos siempre tan acertados, pero sobre todo por su amistad.

A la Dra. María Teresa Orta Ledesma por coordinar tan sabiamente este grupo de trabajo.

Al proyecto PUMAGUA por el apoyo brindado a la realización de este trabajo, en especial al área de Balance Hidráulico por su apoyo brindado.

A mi casa durante tantos años la UNAM que me abrió las puertas desde mi entrada a la ENP No. 4, para después aceptarme en otro de sus recintos, su campus central, específicamente en Facultad de Química, donde obtuve mi formación académica y aprendí tantas otras cosas.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por abrirme sus puertas y permitirme realizar mi trabajo de tesis.

Y finalmente a mi jurado asignado por sus aportaciones realizadas a este trabajo de tesis.

Contenido

Índice de figuras.....	8
Índice de tablas.....	10
Resumen.....	11
Justificación.....	12
Introducción.....	14
Objetivo general.....	16
Objetivos particulares.....	16
Antecedentes.....	17
1. Agua para consumo humano.....	17
1.1. Calidad del agua potable en redes de distribución.....	17
1.2. Monitoreo de la calidad del agua en redes de distribución.....	18
2. Sistema de abastecimiento de agua potable de Ciudad Universitaria.....	21
2.1. Componentes del sistema de abastecimiento.....	21
2.1.1. Fuente de abastecimiento.....	21
2.1.2. Sistema de almacenamiento.....	23
2.1.3. Red de distribución de agua potable.....	23
2.2. Funcionamiento de la red de distribución.....	26
2.3. Desinfección del agua del sistema de abastecimiento.....	27
2.3.1. Sistema de cloración en línea con NaOCl.....	28
2.3.2. Sistema de cloración mediante cloro gas.....	29
Marco teórico.....	33
4. Desinfección de agua para consumo humano.....	33
4.1. Microorganismos patógenos.....	33
4.2. Consideraciones generales para la desinfección.....	34
4.3. Desinfección con Cloro (Cloración).....	35
4.3.1. Mecanismo de desinfección.....	36
4.3.2. Ácido hipocloroso (HOCl).....	36
4.3.3. Reacción del cloro con sustancias presentes en el agua.....	38
4.3.4. Cloración a punto de quiebre (breakpoint).....	41

4.4.	<i>Formas de suministro de cloro</i>	43
4.4.1.	<i>Gas cloro</i>	43
4.4.2.	<i>Hipoclorito de sodio (NaOCl) líquido</i>	44
4.4.3.	<i>Hipoclorito de calcio</i>	45
4.5.	<i>Desinfección secundaria</i>	45
	<i>Metodología</i>	47
5.	<i>Monitoreo de la calidad de agua en la red de distribución de Ciudad Universitaria</i>	47
5.1.	<i>Programa de monitoreo</i>	47
5.1.1.	<i>Número de sitios de muestreo y frecuencia</i>	48
5.2.	<i>Calendario de monitoreo</i>	56
5.3.	<i>Métodos de análisis de parámetros de calidad en la red de agua potable</i>	56
5.4.	<i>EPANET</i>	63
	<i>Resultados</i>	64
6.	<i>Programa de monitoreo para la red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria</i>	64
6.1	<i>Cloro residual libre en agua de la red de distribución</i>	68
6.1.1	<i>Cloro residual en los sectores hidráulicos I y II</i>	69
6.1.2	<i>Cloro residual en el sector hidráulico III</i>	72
6.1.3	<i>Cloro residual denle el sector hidráulico IV</i>	73
6.1.4	<i>Cloro residual en el sector hidráulico V</i>	75
6.1.5	<i>Cloro residual en sitios cercanos a tanques de almacenamiento y pozos de extracción</i>	76
6.2	<i>Calidad microbiológica del agua de la red de distribución</i>	78
6.3	<i>Seguimiento de la calidad del agua potable en Ciudad Universitaria</i>	80
6.4	<i>Desinfección con hipoclorito de sodio (NaOCl)</i>	84
6.4.1	<i>Simulación de dosis y distribución de cloro residual en el agua de la red</i>	84
6.4.2	<i>Estimación de la dosis de NaOCl para desinfección primaria y secundaria</i> . 88	
6.5	<i>Condiciones de operación de los sistemas de desinfección empleando NaOCl.</i>	91
6.5.1	<i>Capacidad de los sistemas de cloración y consumo de desinfectante</i>	91
	<i>Conclusiones</i>	96
	<i>Recomendaciones</i>	97
	<i>Referencias</i>	98

<i>Anexos</i>	100
Anexo 1. Calidad del agua.....	100
Anexo 2. Evaluación de la calidad del agua (2008).....	103
Anexo 3. Dependencias que integran los sectores hidráulicos.	105
Anexo 4. Dependencias de CU en listadas por la DGSM.....	110

Índice de figuras.

Figura 1 Mapa de ubicación de pozos de abastecimiento.	22
Figura 2 Materiales de la red de distribución de CU.	24
Figura 3 Sectorización de la red de distribución.	25
Figura 4 Operación de la red de distribución (PUMAGUA, 2011).	27
Figura 5 Diagrama del sistema de desinfección instalado en el Pozo de Facultada de Química. (PUMAGUA, 2009).	28
Figura 6 Diagrama del sistema de desinfección instalado en el Pozo del Multifamiliar y el Pozo Vivero Alto (PUMAGUA, 2009).	29
Figura 7 Porcentaje de disociación entre el ácido hipocloroso y el ion hipoclorito, en función de la temperatura y del pH.	37
Figura 8 Curva de cloración a punto de quiebre (breakpoint).	42
Figura 9 Tipos de muestreo probabilístico	49
Figura 10 Sitios de monitoreo en CU.	55
Figura 11 Material, reactivo y equipo resumido para la determinación de cloro residual libre en campo.	57
Figura 12 Procedimiento para la cuantificación de cloro residual en campo.	57
Figura 13 Material y equipo para realizar la toma de muestra de análisis microbiológicos.	58
Figura 14 Procedimiento de toma de muestra para análisis microbiológicos.	59
Figura 15 Material, reactivos y equipo para la elaboración de análisis microbiológicos.	59
Figura 16 Técnica para el análisis microbiológico de coliformes fecales (NOM-181-SSA1-1998).	60
Figura 17 Material y equipo para la toma de muestra de análisis fisicoquímicos.	61
Figura 18 Procedimiento de toma de agua para análisis fisicoquímico	61
Figura 19 Material, reactivos y equipo para la elaboración de análisis fisicoquímico.	62
Figura 20 Procedimiento para la determinación de parámetros fisicoquímicos.	63
Figura 21 Distribución de los sitios de monitoreo, tanques de almacenamiento y pozos de extracción.	67
Figura 22 Comportamiento del cloro residual en la red de distribución.	68
Figura 23 Cloro residual libre en puntos de muestreo ubicados en los sectores hidráulicos I y II que son abastecidos con agua del Tanque Bajo.	70
Figura 24 Cloro residual libre en puntos de muestreo ubicados en el sector hidráulico III que es abastecidos por el Pozo Multifamiliar.	73
Figura 25 Cloro residual libre en punto de muestreo (Taller de Conservación, 1,162m) del Sector Hidráulico V abastecido con agua del Tanque Alto.	74
Figura 26 Cloro residual libre en puntos de muestreo del Sector Hidráulico V abastecido principalmente con agua del Tanque Vivero alto.	76
Figura 27 Cloro residual libre en sitio cercano al pozo Vivero Alto y Estación de Bomberos.	77

Figura 28 Mapa de cloro residual obtenido por EPANET con una dosis de desinfectante de 2mg/L.	86
Figura 29 Mapa del comportamiento de cloro residual con una dosis inicial de 1.50 mg/L.	89
Figura 30 Mapa del comportamiento de cloro residual con una dosis inicial de 0.75 mg/L.	90

Índice de tablas.

Tabla 1 Características de los pozos de extracción (PUMAGUA 2009).	21
Tabla 2 Características de los tanques de almacenamiento (PUMAGUA 2009).	23
Tabla 3 Longitud y porcentajes relativos de los materiales que conforman la red de distribución (PUMAGUA, 2009).	24
Tabla 4 Sectores hidráulicos (PUMAGUA, 2009).	26
Tabla 5 Especificaciones del sistema de desinfección en el Pozo Facultad de Química. (Castro, 2011).	28
Tabla 6 Especificaciones del Sistema de desinfección en el Pozo Multifamiliar y Pozo Vivero Alto. (Castro, 2011).	29
Tabla 7 Propiedades físicas y químicas del cloro.	35
Tabla 8 Compuestos clorados provenientes de amoníaco.	39
Tabla 9 Frecuencia y número de muestras para el monitoreo de cloro residual libre (NOM-179-SSA1-1998).	48
Tabla 10 Selección final de sitios de monitoreo en la red de distribución.	53
Tabla 11 Selección final de sitios de monitoreo en los tanques de almacenamiento.	54
Tabla 12 Calendario de muestreo.	56
Tabla 13 Coordenadas de los sitios de monitoreo, tanques de almacenamiento y pozos de extracción.	66
Tabla 14 Resultados de análisis microbiológicos	80
Tabla 15 Resultados promedios de los análisis fisicoquímicos del agua potable en la red de distribución.	81
Tabla 16 Evolución de la calidad del agua potable en CU (PUMAGUA, 2008, 2009).	83
Tabla 17 Comparación de valores de cloro residual obtenidos por el monitoreo y el simulador.	87
Tabla 18 Flujos de dosificación para diferentes dosis de NaOCl al 13%	92
Tabla 19 Consumo de NaOCl como desinfectante primario (1.5 mg/L) y secundario (0.75 mg/L) para la desinfección del agua de los pozos de abastecimiento.	92
Tabla 20 Características del sistema de desinfección primario con NaOCl.	94
Tabla 21 Características del sistema de desinfección secundario con NaOCl.	95
Tabla 22 Contaminantes microbiológicos. Anexo 1.	100
Tabla 23 Contaminantes físicos y organolépticos. Anexo 1.	100
Tabla 24 Contaminantes químicos. Anexo 1.	101
Tabla 25 Contaminantes radioactivos. Anexo 1.	102
Tabla 26 Calidad del agua potable 2008. Anexo 2.	103
Tabla 27 Dependencias en listadas por la DGSM. Anexo 3.	110

Resumen

En esta tesis se evalúan las condiciones para la implementación de un sistema de desinfección secundaria utilizando hipoclorito de sodio para garantizar los niveles de cloro residual libre en la red de distribución de agua potable del Campus Central de la UNAM. La desinfección secundaria se evaluó para dos posibles alternativas: para el sistema de desinfección actual (cloración a pie de pozo), evaluando la necesidad de instalar puntos de re-cloración en la red para mantener los niveles adecuados de cloro residual libre; y para un sistema de desinfección combinado alterno, O₃-NaOCl, en donde el hipoclorito de sodio sería utilizado como desinfectante secundario.

En una primera etapa, se realizó el monitoreo en campo de cloro residual en el agua de la red de distribución y se analizó la calidad microbiológica. Durante 35 días se realizaron muestreos de agua (2 veces por semana) en 18 puntos representativos, encontrándose residuales de cloro en la mayoría de los casos dentro los límites permisibles (0.2-1.5 mg/L, NOM-127-SSA1-1994), incluyendo los extremos de la red; el valor promedio mínimo detectado fue de 0.85 mg/L y el máximo de 1.39 mg/L. En 7 de los puntos de muestro la concentración máxima permisible llegó a ser ligeramente superada (1.59 ± 0.05 mg/L) en al menos uno de los cinco muestreos realizados. Con respecto a la calidad microbiológica, los resultados indican ausencia de Coliformes fecales en todas las muestras analizadas, cumpliendo así con este requisito para su consumo, lo cual fue consistente con los niveles de cloro libre residual encontrados en agua.

Mediante el programa de simulación de redes hidráulicas EPANET se estimaron los requerimientos de dosis de NaOCl y la distribución del cloro en el agua de la red para las alternativas evaluadas. Para el sistema de desinfección actual, los resultados del monitoreo de cloro residual libre en campo, indicaron que bajo las condiciones actuales de operación del sistema de abastecimiento de agua, no se requiere de la instalación de puntos de re-cloración en la red de distribución, sin embargo se considera necesario realizar un ajuste en los niveles de dosificación de desinfectante para evitar problemas de sobre-cloración del agua en puntos de

consumo. Los resultados de simulación indican que con una dosis de cloro activo de 1.50 mg/L, es posible mantener en los extremos de la red residuales de cloro de 0.65 mg/L, los cuales se encuentran dentro de lo recomendado por norma para garantizar la calidad microbiológica del agua. Para el sistema de desinfección combinado (O_3 -NaOCl), se estimó que con una dosis equivalente a 0.75 mg/L de cloro activo, se podrían mantener residuales de cloro en los extremos de la red en el orden de 0.33 mg/L, que al igual en el caso anterior, permitiría preservar la calidad microbiológica del agua.

Justificación

A principios del 2008 dio inicio en la UNAM el Programa de Manejo, Uso y Reúso del Agua (PUMAGUA), el cual está conformado por cuatro ejes principales: Balance Hidráulico, Calidad del Agua, Sistema de Información Geográfica y Comunicación y Participación. Uno de los objetivos del programa es “asegurar la calidad del agua potable con el fin de poder garantizar la ingesta directa en los distintos puntos de consumo del Campus Universitario” (PUMAGUA, 2008).

En una primera fase de estudio, el Grupo de Trabajo encargado de la Calidad del Agua (II-UNAM), realizó muestreos puntuales en fuentes de abastecimiento, tanques de almacenamiento y red de distribución para evaluar la calidad del recurso. Uno de los parámetros claves del monitoreo fue el nivel de cloro residual libre acorde con la NOM-127-SSA1-1994 (0.20 a 1.50 mg/L), encontrándose que en los extremos de la red, el agua no contenía los niveles mínimos requeridos para garantizar la calidad microbiológica. Por el contrario, en sitios cercanos a los puntos de cloración, los niveles superaban los límites máximos permisibles; lo que trae como consecuencia características organolépticas indeseables en el agua y condiciones que potencian la posible formación de subproductos de cloración (THMs). En una segunda etapa de estudio se revisaron los sistemas de desinfección a base de cloro gas (Cl_2) e hipoclorito de sodio (NaOCl) instalados a pie de pozo y como resultado de ello, se hicieron recomendaciones para actualizar los cloradores y cambiar el cloro gas por hipoclorito de sodio como desinfectante.

De manera paralela se hicieron también estudios a escala laboratorio para evaluar un método de desinfección alternativo mediante la combinación "O₃-NaOCl", en donde el ozono es utilizado como desinfectante primario y el NaOCl como desinfectante secundario (Castro, 2011). La desinfección del agua de abastecimiento de Ciudad Universitaria mediante la tecnología de ozono fue estudiada con mayor detalle por Nava y Olivares (2011) quienes abordaron los aspectos de transferencia de masa del ozono en el agua y el dimensionamiento de una cámara de contacto.

Con base en lo anteriormente expuesto, se consideró necesario realizar por un lado un monitoreo más completo de los niveles de cloro residual libre incluyendo puntos representativos de toda la red de distribución y evaluar la necesidad de contar con un sistema de desinfección secundaria mediante puntos de re-cloración para garantizar la presencia de residuales en los extremos de la red. Por otra parte, tomando en cuenta las recomendaciones de cambio del cloro gas como desinfectante por hipoclorito de sodio, es importante evaluar las condiciones de dosificación de NaOCl y la capacidad de los nuevos cloradores. De igual manera es necesario evaluar las características del sistema de desinfección secundaria basado en el uso de NaOCl, para el método alternativo de desinfección O₃-NaOCl, con el fin de garantizar los residuales de cloro en el agua de la red de distribución.

Introducción

Los problemas de abastecimiento de agua potable, cantidad y calidad de la misma cada día son mayores, por ello es indispensable elaborar estrategias de solución basadas en objetivos de salud y satisfacción de los consumidores, tomando en cuenta que la calidad es el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas que presenta determinado tipo de agua. En este sentido en la UNAM se llevan a cabo investigaciones dirigidas hacia un plan de agua segura, que promueva la preservación y el mejoramiento de la calidad del vital recurso (PUMAGUA, 2008).

La reducción de riesgos de naturaleza microbiológica es prioritaria, debido a que las infecciones causadas por patógenos son la causa más común de enfermedades o muerte asociada con el consumo de agua (Christman, 1998). Esto debe hacerse sin descuidar los riesgos de naturaleza química como puede ser la presencia y la posible formación de subproductos de desinfección (THMs, Trihalometanos) entre otros contaminantes químicos contemplados en la norma mexicana relativa al agua para consumo humano (NOM-127-SSA1-1994, modificada en el 2000).

Para revisar las condiciones de calidad del agua potable en la UNAM se ha contemplado de manera asistemática (monitoreo) la evaluación del sistema de abastecimiento del Campus Universitario. Se ha llevado a cabo estudios de calidad mediante muestreos puntuales en las fuentes de abastecimiento, en los sistemas de almacenamiento y red distribución, permitiendo con ello identificar deficiencias en los niveles de cloro libre residual y posible presencia de indicadores microbiológicos distintos a los que marca la norma (PUMAGUA, 2008, 2010) y que actualmente están siendo estudiados. Por otra parte, se ha realizado una valoración de las condiciones de operación de los sistemas de desinfección instalados y se han propuesto opciones de mejoras (PUMAGUA, 2010; Castro, 2011).

La presente tesis forma parte del Proyecto PUMAGUA que actualmente se desarrolla en la UNAM. Aborda aspectos relacionados con el monitoreo de cloro residual libre y la calidad microbiológica del agua de la red de abastecimiento, las condiciones generales para la implementación de un sistema de desinfección secundaria utilizando hipoclorito de sodio para garantizar los residuales de cloro en el agua de la red de distribución. Así mismo se abordan las condiciones de dosificación de NaOCl y la capacidad de los sistemas de cloración, tomando en cuenta las recomendaciones de cambio del cloro gas como desinfectante por hipoclorito de sodio, para la actualización de los sistemas actuales de desinfección.

Objetivo general

Evaluar la implementación de un sistema de desinfección secundaria para la red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria utilizando hipoclorito de sodio para garantizar los niveles de cloro residual libre acordes a la NOM-127-SSA1-1994.

Objetivos particulares

1. Conformar un programa de monitoreo para evaluar la calidad del agua de la red de distribución de Ciudad Universitaria.
2. Evaluar en campo los niveles de cloro residual libre y la calidad microbiológica del agua de la red de distribución.
3. Estimar la dosis de NaOCl y la distribución de cloro residual en el agua de la red mediante el programa de simulación EPANET.
4. Evaluar la necesidad de implementar puntos de recloración en la red de distribución con base en los resultados experimentales de monitoreo en campo y de simulación en EPANET.
5. Definir las condiciones de operación para los sistemas de desinfección con NaOCl.

Antecedentes

Dentro de este capítulo se define al agua para uso y consumo humano y las medidas para identificar problemas asociados con esta; de igual forma se describe la red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria y los estudios que se están realizando para mejorar la calidad del agua dentro de la institución.

1. Agua para consumo humano.

La NOM-127-SSA1-1994¹ la define como aquella agua que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos para la salud; también se denomina agua potable. El agua potable debe cumplir con los índices de calidad establecidos en dicha norma, la cual establece 46 indicadores y los límites máximos permisibles para que pueda ser considerada apta para consumo. Los indicadores se dividen en cuatro grupos: microbiológicos, físicos y organolépticos, químicos y radioactivos (ver Anexo 1).

1.1. Calidad del agua potable en redes de distribución.

Cuando la alimentación es discontinua, la calidad del agua se deteriora por la existencia de puntos muertos en las redes de distribución, viéndose afectados algunos sectores de la red debido a los tiempos de almacenamiento adicionales. El tiempo de residencia es un factor que se asocia a los problemas de recontaminación microbiológica, cuando el agua permanece estancada por largos periodos de tiempo, llega a afectar y a disminuir los niveles de cloro libre residual.

Otro factor que influye en la calidad del agua es la biopelícula que se forma a partir de la multiplicación de los microorganismos que se adhieren a la superficie interior

¹ NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

de la tubería, dicha formación se ve favorecida cuando se tienen bajos niveles de cloro y bajas velocidades de flujo.

Es importante mencionar que no siempre la menor concentración de cloro residual se presenta en las zonas más alejadas de la red de distribución, el decaimiento de cloro también se puede presentar en tanques de almacenamiento y zonas de flujo lento. Otros factores que afectan la concentración de cloro son:

- La temperatura de agua
- El alto contenido de materia orgánica
- Puntos de reclusión mal ubicados
- Dosis insuficiente de cloración
- Presencia de hierro y manganeso

Por otra parte, el exceso de cloro residual libre también afecta la calidad del agua, puede generar efectos colaterales e incluso nocivos a la salud, esto debido a que reacciona con la materia orgánica cuando esta se encuentra contenida en el agua, dando origen a los llamados subproductos de cloración conocidos también como trihalometanos (THMs), que se sabe tienen efectos carcinogénicos (OMS, 2006).

1.2. Monitoreo de la calidad del agua en redes de distribución

La calidad del agua potable en redes de distribución requiere de ser monitoreada de manera rutinaria mediante el análisis de indicadores microbiológicos y cuantificando los niveles de cloro residual libre (NOM-179-SSA1-1998²).

La efectividad o el buen funcionamiento del proceso de desinfección se pueden evaluar mediante el análisis de indicadores microbiológicos tales como los Coliformes fecales (CF). Es importante mencionar que la ausencia de CF, no

² NOM-179-SSA1-1998, Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público.

significa necesariamente la ausencia total de microorganismos patógenos, sin embargo se acepta por norma que un agua que cumple con este requisito, es bacteriológicamente apta para su consumo. La cuantificación de cloro libre residual es otra forma de evaluar la efectividad del sistema de desinfección, ya que su presencia en la red de distribución, en los niveles recomendados (0.2–1.5 mg/L; NOM-127-SSA1-1994), es un indicativo del buen funcionamiento del sistema desinfección y por lo tanto de la inocuidad del agua.

Para evaluar adecuadamente la calidad del agua en una red de distribución y en general en los sistemas de abastecimiento, es necesario contar con un programa de monitoreo, en el cual se establecen los puntos de muestreo, el número de muestras, la frecuencia de muestreo y los parámetros indicadores a medir. La Norma Oficial Mexicana NOM-179-SSA1-1998³, establece los criterios básicos que se deben considerar en un programa de análisis de calidad de agua en sistemas de abastecimiento público.

Los puntos de muestreo son un punto crítico a considerar, algunos criterios para la selección son los siguientes (*Cofepris, CONAGUA, 2010*):

- Seleccionar tomas domiciliarias como puntos fijos de muestreo, se debe entender esta como aquella que se alimenta directamente de la red de distribución, antes de ingresar a la red interna del inmueble.
- Seleccionar zonas densamente pobladas y zonas con distribución intermitente (distribución tandeada).
- Ubicación de los sitios de monitoreo dependiendo del tipo de red de distribución y en proporción al número de ramales.
- Antecedentes de sitios de la red con problemas de contaminación.
- Se deberán considerar puntos muertos, puntos de baja presión, puntos con fugas frecuentes y puntos periféricos a la red de distribución.

³ NOM-179-SSA1-1998 Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuido por sistemas de abastecimiento público.

El muestreo juega un papel importante en el monitoreo de la calidad de un agua. Consiste en obtener volúmenes de agua de los sitios seleccionados del sistema de abastecimiento, de tal manera que sean representativos, con el propósito de evaluar características físicas, químicas o microbiológicas (NOM-230-SSA1-2002⁴).

La UNAM no cuenta con un programa de monitoreo formal para evaluar en forma permanente la calidad del agua en el sistema de abastecimiento. La Dirección General de Servicios Médicos (DGSM) de la UNAM es la encargada de llevar un control en las 136 dependencias del Campus Universitario, realiza muestreos de agua cuatro veces por año para hacer mediciones de pH, cloro residual y análisis de Coliformes totales y Mesófilos, tomando como base la NOM-093-SSA1-1994 (Castro, 2011).

A partir de 2008 se empezaron a realizar muestreos en diferentes puntos del sistema de abastecimiento, y se han llevado a cabo el análisis de constituyentes químicos como lo indica la NOM-127-SSA1-2000 (ver resultados en Anexo 2). Durante 2009 y 2010 se continuaron realizando muestreos puntuales y análisis fisicoquímicos y microbiológicos, en el agua de la fuente de abastecimiento, tanques de almacenamiento y red de distribución (PUMAGUA, 2009 y 2010).

⁴NOM-230-SSA1-2002, Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua, procedimientos sanitarios para el muestreo.

2. Sistema de abastecimiento de agua potable de Ciudad Universitaria

2.1. Componentes del sistema de abastecimiento

El sistema de abastecimiento de agua potable lo componen la fuente de abastecimiento, el sistema de almacenamiento y la red de distribución.

2.1.1. Fuente de abastecimiento

El Campus Central de la UNAM cuenta con tres pozos de extracción profundos que son de uso exclusivo: Pozo Facultad de Química, Pozo Multifamiliar y Pozo Vivero Alto. Las características de los pozos de extracción se resumen en la tabla 1 y su ubicación en el Campus en la Figura 1. El gasto total promedio de extracción es del orden de 172 L/s y la mayor parte de agua se obtiene del Pozo Multifamiliar.

Tabla 1 Características de los pozos de extracción (PUMAGUA 2009).

Pozo	Gasto promedio (L/s)	Profundidad (m)	Potencia Bomba (HP)	% extracción
Química	35	132	125	15
Multifamiliar	92	193	250	59
Vivero Alto	45	157	250	26

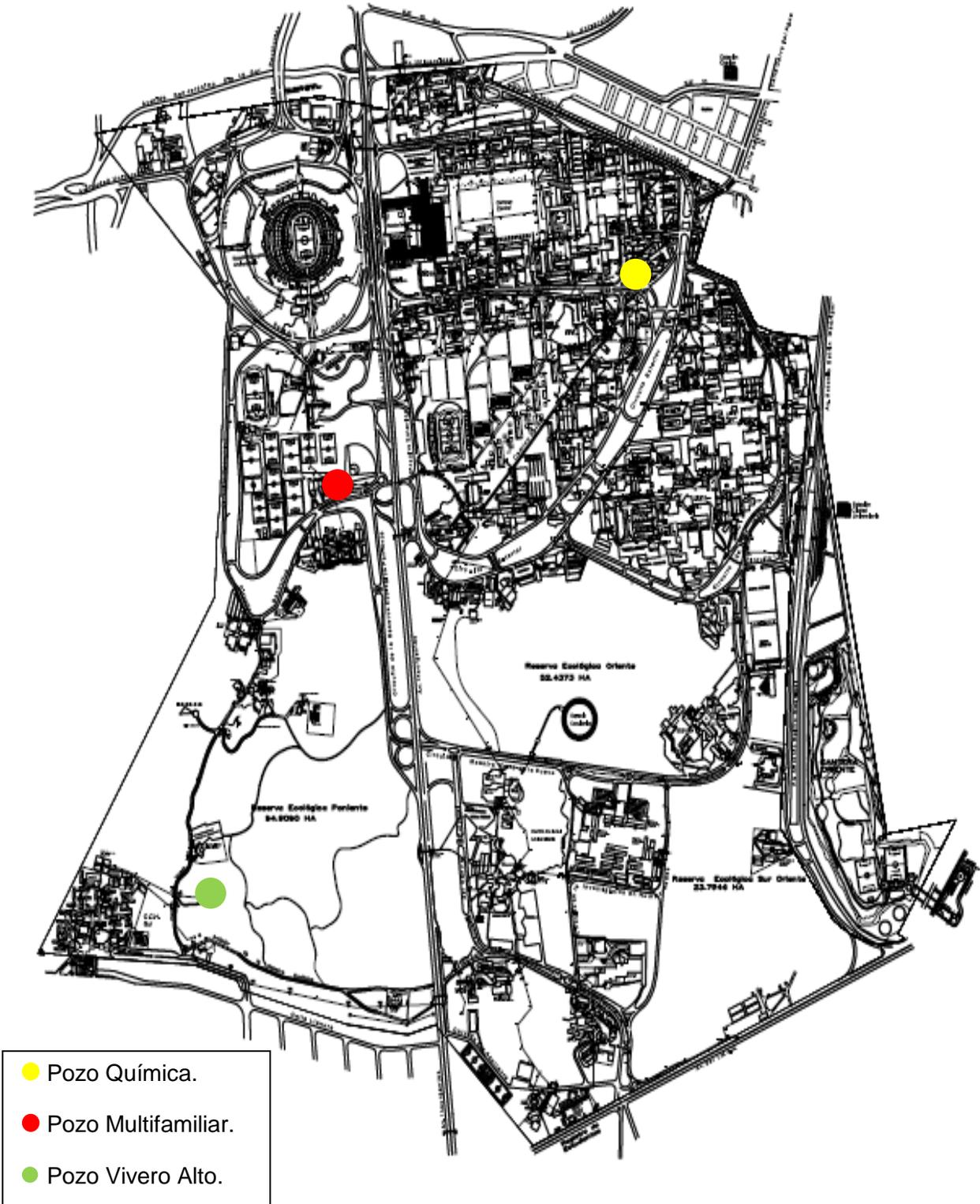


Figura 1 Mapa de ubicación de pozos de abastecimiento.

2.1.2. Sistema de almacenamiento

Consta de tres tanques en los cuales se almacena el agua que se extrae de los pozos de abastecimiento una vez que esta es desinfectada, siendo estos el Tanque Bajo, Tanque Alto y Tanque Vivero Alto; este último está a su vez integrado por cuatro contenedores. En la tabla 2 muestra las dimensiones y la capacidad de cada uno.

Tabla 2 Características de los tanques de almacenamiento (PUMAGUA 2009).

Tanque	Ancho (m)	Largo (m)	Alto (m)	Capacidad (m ³)	Nivel mínimo (m)	Nivel máximo (m)
Bajo	23	29	3	2,000	2	2.9
Alto	25	40	4	4,000	3.2	3.9
Vivero Alto	20	25	3	6,000	2.1	2.9

2.1.3. Red de distribución de agua potable

Es un sistema mixto en el cual el agua se distribuye por gravedad y por bombeo directo a la red. En el primer caso, el agua el agua se extrae de los pozos se envía a los tanques de almacenamiento, a partir de los cuales fluye por gravedad hacia la red de distribución. La red está integrada por aproximadamente 54 km de tubería de diversos diámetros y materiales (acero, asbesto, hierro fundido, policloruro de vinilo (PVC) y polietileno de alta densidad (PEAD). La figura 2 y la tabla 3 muestran la contribución de los materiales en las diferentes tuberías que conforman la red de distribución. Esta red conformada por ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetros, uniones de tuberías de diferentes materiales o diámetros, terminales de conductos, válvulas, cruceros entre tuberías, entre otros.

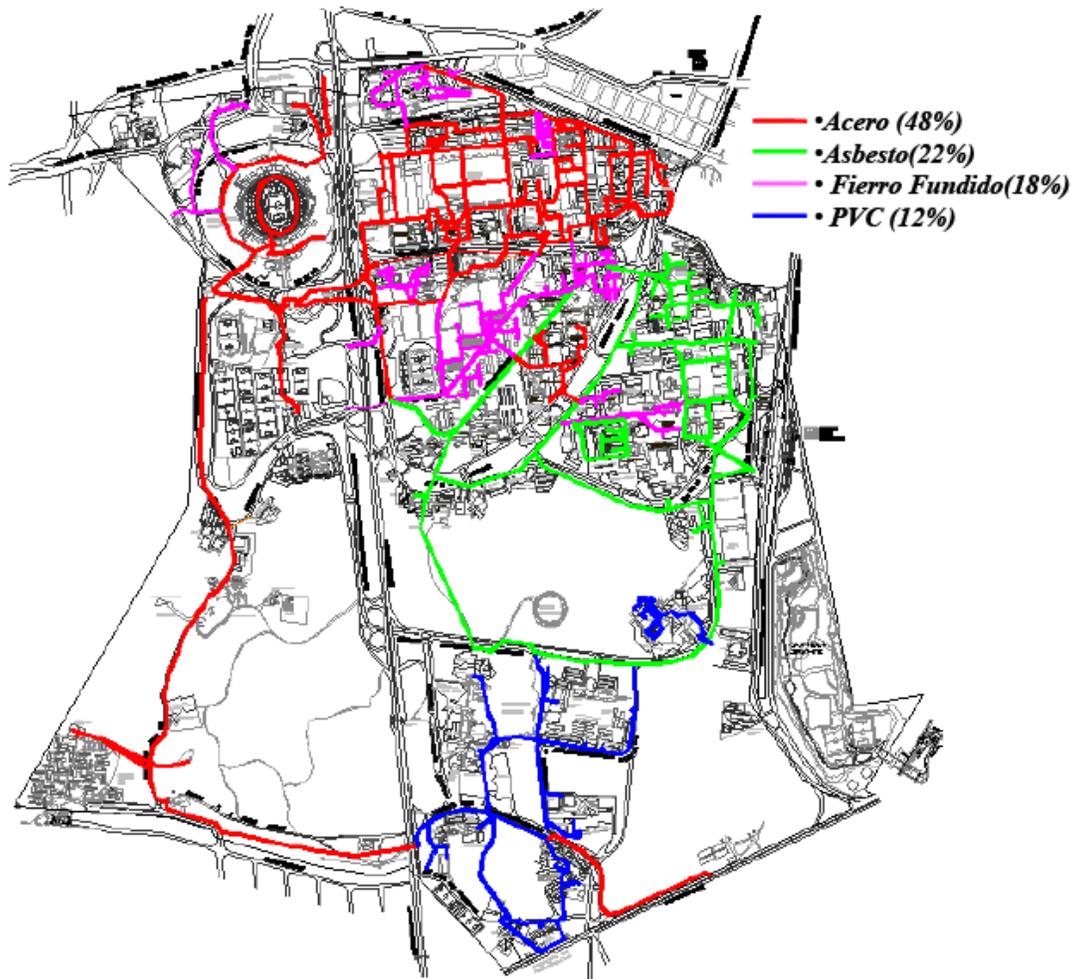


Figura 2 Materiales de la red de distribución de CU.

Tabla 3 Longitud y porcentajes relativos de los materiales que conforman la red de distribución (PUMAGUA, 2009).

Material	Longitud (m)	% relativo
Acero	25,610	47.8
Asbesto	11,785	22.0
Fierro fundido	9,623	18.0
PEAD	750	1.4
PVC	5,802	10.8
Total	53,570	100.0

La red de distribución se encuentra delimitada en 5 sectores hidráulicos, figura 3. En la tabla 4 se en listan algunas características de cada sector, de igual forma en el Anexo 3 se muestran las dependencias que integran cada sector hidráulico.

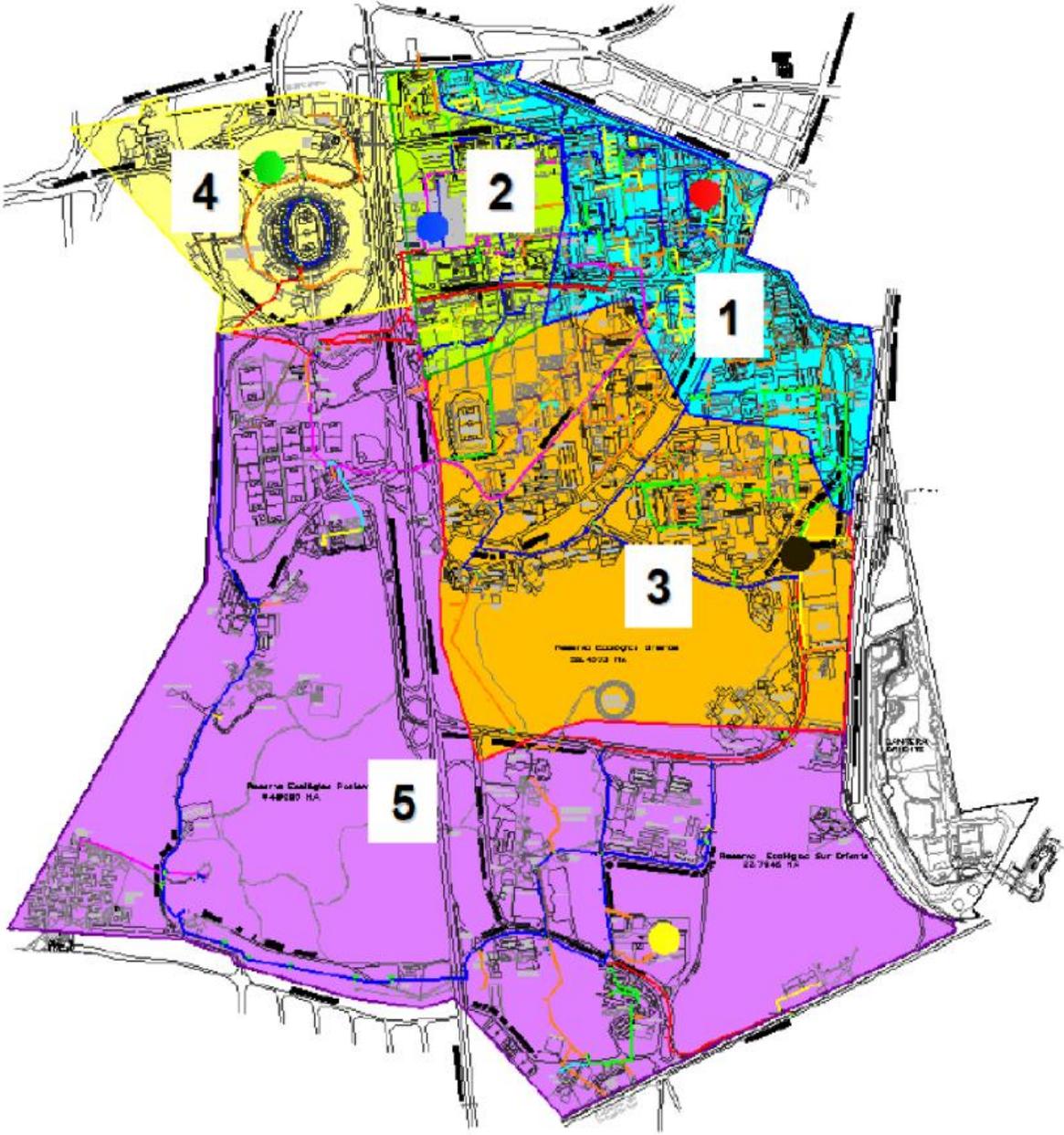


Figura 3 Sectorización de la red de distribución.

Tabla 4 Sectores hidráulicos (PUMAGUA, 2009).

Sector	Dependencias	Población (usuarios/día)	Consumo de agua (L/s)	Tipo de dependencias
I	39	41,500	2.3 - 9.61	40% Institutos y Centros de Investigación
II	20	38,560	8.95	40% Académicas 30% Administrativas
III	31	35,000	8.10	Administrativo e Investigación
IV	20	4,510	6.94	En este sector se localiza el Estadio Universitario con una capacidad para 60,000 personas.
V	27	13,750	3.18	Cultural y Administrativo

2.2. *Funcionamiento de la red de distribución*

El agua que se extrae del pozo de Facultad de Química y del Multifamiliar se envía al Tanque Bajo y de ahí al Tanque Alto para abastecer al sector hidráulico IV. Con el agua proveniente del Tanque Bajo se abastece a los sectores hidráulicos I y II. El Pozo Multifamiliar además de abastecer al Tanque Bajo, también envía agua directamente a la red de distribución. Cuando esto ocurre, se pueden presentar dos situaciones en la operación de la red: 1) el agua es enviada a red a través de una derivación ubicada cerca del tren de descarga del pozo, de esta manera es posible abastecer al sector hidráulico III; 2) el agua es enviada por la línea que abastece al Tanque Bajo, pero esta no entra a dicho tanque debido a un cierre de válvulas ubicadas a la entrada del mismo, permitiendo así el abastecimiento de los sectores hidráulicos I y II. El Pozo 3 abastece a los Tanques del Vivero Alto y estos a su vez distribuyen al sector hidráulico V y al Tanque Alto; de este último se distribuye agua al sector hidráulico IV. La figura 4 es un esquema que describe el funcionamiento de la red de distribución.

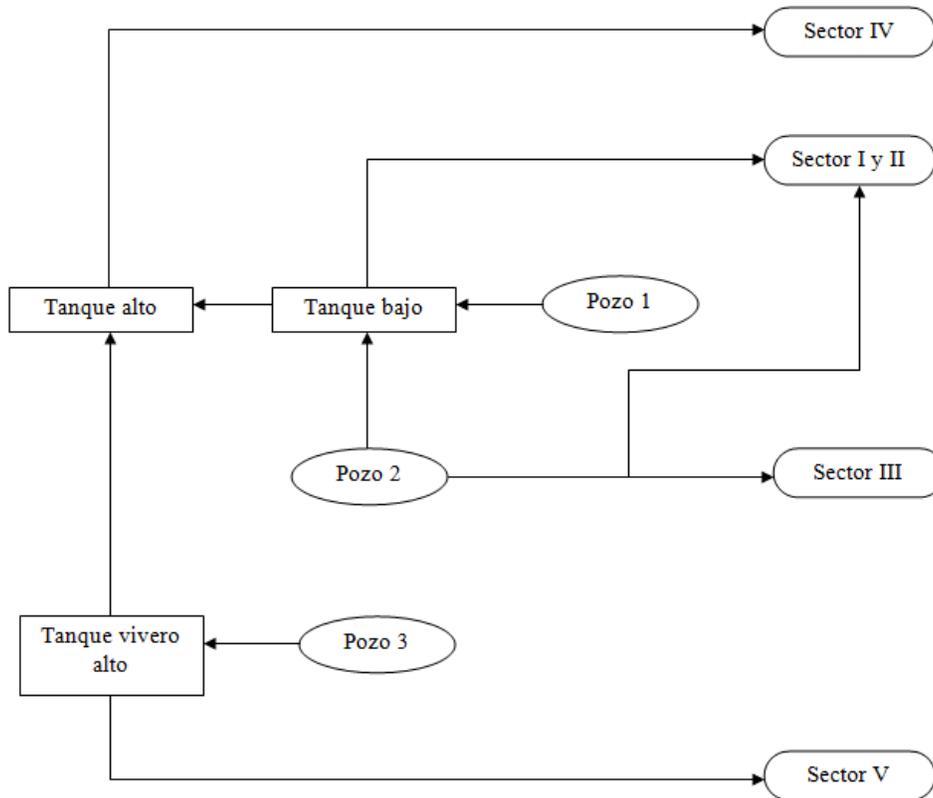


Figura 4 Operación de la red de distribución (PUMAGUA, 2011).

Actualmente se están realizando y estudiando cambios en la operación de la red de distribución de agua, por lo que el funcionamiento descrito en este apartado está sujeto a posibles cambios.

2.3. *Desinfección del agua del sistema de abastecimiento*

El agua que se extrae de los pozos de abastecimiento es desinfectada antes de ser enviada al los tanques almacenamiento o a la red distribución. Cada pozo de extracción cuenta un sistema de cloración en línea instalado a pie de pozo, a continuación se presenta una breve descripción al respecto.

2.3.1. Sistema de cloración en línea con NaOCl

Se encuentra instalado en el Pozo de la Facultad de Química junto al edificio C. Utiliza hipoclorito de sodio al 13% y consiste de un tanque reservorio para el NaOCl con capacidad de 100L. El pozo cuenta con una bomba sumergible de 85Hp, tiene instalado un clorador Wallace & Tiernan, un dosificador LM1 y un arrancador de 440 V marca Siemens. La tabla 5 muestra las condiciones bajo la cuales opera el sistema de desinfección y la figura 5 el diagrama correspondiente.

Tabla 5 Especificaciones del sistema de cloración en el Pozo Facultad de Química (Castro, 2011).

Sistema de desinfección	
Desinfectante	Hipoclorito de sodio (NaOCl)
Gasto del desinfectante	1.15×10^{-4} L/s
Capacidad del tanque dosificador	100 L
Dosis calculada	0.60 mg/L

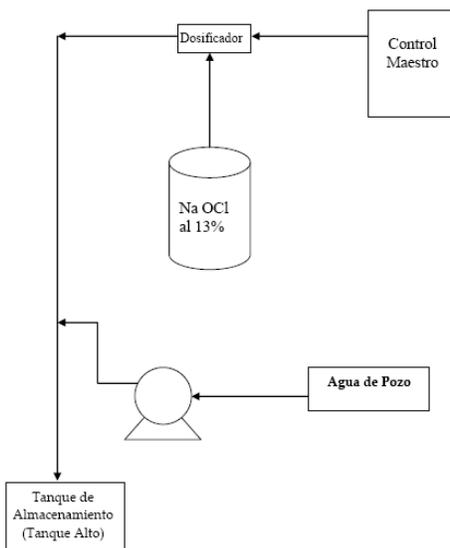


Figura 5 Diagrama del sistema de cloración instalado en el Pozo de Facultad de Química. (PUMAGUA, 2009).

2.3.2. Sistema de cloración mediante cloro gas

Se encuentra instalado en los Pozos Multifamiliar y Vivero Alto, respectivamente. Cada pozo cuenta un tanque inyector de cloro gas, una bomba sumergible de 200 Hp, un clorador marca Wallace & Tiernan y un arrancador a tensión reducida de 250 Hp y 440 V marca Siemens. La tabla 6 muestra las condiciones de operación del sistema de desinfección y la figura 6 el diagrama correspondiente.

Tabla 6 Especificaciones del Sistema de desinfección en el Pozo Multifamiliar y Pozo Vivero Alto (Castro, 2011).

Sistema de Desinfección	Pozo Multifamiliar	Pozo Vivero Alto
Desinfectante	Cloro gas (Cl ₂)	Cloro gas (Cl ₂)
Gasto del desinfectante	0.67 Kg/h	0.38 Kg/h
Capacidad del tanque dosificador	908 Kg	908 Kg
Dosis calculada	2.1 mg/L	2.3 mg/L

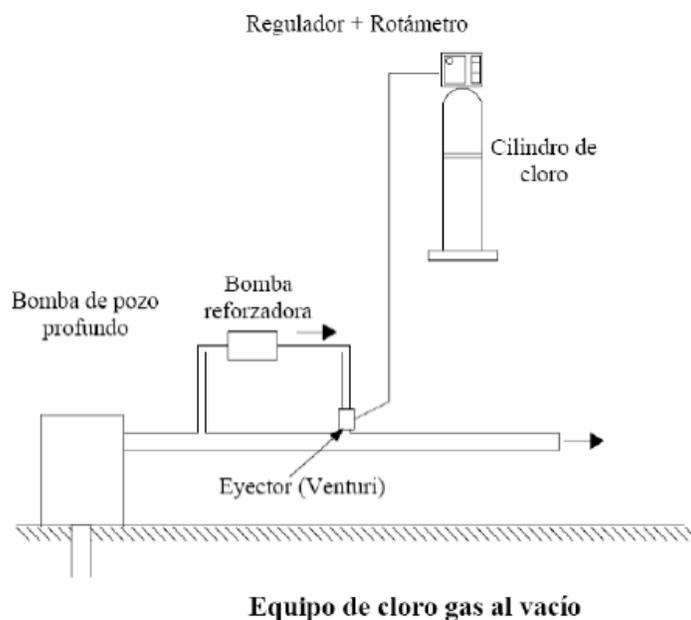


Figura 6 Diagrama del sistema de desinfección instalado en el Pozo del Multifamiliar y el Pozo Vivero Alto (PUMAGUA, 2009).

3. Estudios recientes del sistema de desinfección de Ciudad Universitaria

De 2009 a la fecha se han venido realizando estudios para proponer mejoras al sistema de desinfección. Se han llevado a cabo muestreo puntuales de agua para cuantificar la concentración de cloro residual en tanques de almacenamiento y en algunos puntos de la red de distribución para evaluar el nivel de dosificación de los desinfectantes (PUMAGUA 2009, 2010). De estos muestreos se detectó en los tanques de almacenamiento concentraciones que llegan a superar lo establecido por norma (0.2 a 1.5 mg/L, NOM-127-SSA1-1994). Por otra parte, en algunos puntos extremos de la red, la concentración de cloro residual se encontró por debajo de los niveles recomendados.

Las dosis elevadas en ocasiones suelen ser necesarias debido a los tiempos prolongados de almacenamiento del agua, al tamaño y complejidad de las redes de abastecimiento, no obstante deben ser continuamente vigiladas para evitar problemas de sobrecloración en los puntos de consumo. Por el contrario, la ausencia o las bajas concentraciones de cloro residual, como ya se mencionó anteriormente, pueden crear problemas de contaminación microbiológica, lo que puede poner en riesgo la salud de los consumidores.

Los resultados de dichos muestreos indican que es necesario realizar estudios más detallados para conocer la distribución de cloro residual, mediante un programa de monitoreo que incluya puntos representativos de toda la red de distribución, para llevar a cabo las medidas correctivas necesarias que garanticen los residuales de cloro. En la presente tesis se realizan estudios de campo que abordan esta problemática y se evalúa la necesidad de contar con un sistema de desinfección secundaria para la red de distribución mediante puntos de recloración.

Una de las modificaciones que se ha propuesto al sistema de desinfección es la sustitución del cloro gas (Cl_2) por NaOCl como desinfectante, debido a las implicaciones de riesgo y seguridad que tiene su manejo; al respecto existe el antecedente de un caso de intoxicación, debido a una fuga que ocurrió en una de

la instalaciones (PUMAGUA, 2009). Cuando existen fugas de gas cloro, estas son de gran magnitud debido a que se mezcla con el aire y se esparce rápidamente en grandes áreas. Irrita la mucosa del sistema respiratorio, produce náuseas, dolor de cabeza y bloqueo del sistema nervioso. En altas concentraciones dificultad la respiración al punto de muerte por sofocación o neumonía química. Provoca irritaciones y quemaduras locales. El contacto con los ojos provoca visión borrosa y deformada, enrojecimiento, dolor y severa quemadura del tejido ocular, puede llegar a causa ceguera. A bajas concentraciones en el aire produce ligeros síntomas irritantes después de horas de exposición.

Como se mencionó anteriormente, dos de los pozos de extracción (Vivero Alto y Multifamiliar) cuentan con sistemas de cloración a base de cloro gas. De manera preliminar en estudios previos se determinaron la dosis de NaOCl a aplicar y las características de los cloradores para cada caso, esto con base en los resultados de demanda de cloro del agua de los pozos y los resultados del monitoreo puntual de cloro residual en tanques y en la red (PUMAGUA, 2010; Castro, 2011). En la presente tesis, las condiciones y las características de los sistemas de cloración con NaOCl, fueron corroboradas con base en los estudios de campo.

La evaluación y reducción de riesgos de naturaleza microbiológica es un tema prioritario que ha cobrado un interés particular para el sistema de abastecimiento de agua potable de la UNAM pues las infecciones por patógenos son la causa más común de enfermedad o muerte asociada al agua de consumo. Investigaciones recientes han permitido detectar la presencia de bacterias del género *Salmonella spp.* en el agua de los Pozos del Vivero Alto y Facultad de Química. También se detectaron bacterias del grupo *Enterococos Fecales* y *Colifagos* en el agua del Pozo Multifamiliar, y bacterias del género *Shigella spp.* en el Pozo del Vivero Alto y *Escherichia coli* en los tres pozos de abastecimiento. (PUMAGUA, 2010). De igual forma estudios realizados en la Ciudad de México en fuentes de agua subterránea y en sistemas de distribución han detectado la presencia de diferentes bacterias patógenas, entre ellas *Helicobacter pylori* (*H. pylori*), donde se encontró que esta bacteria se encontraba presente antes y

después del sistema de desinfección (cloración) (Mazari, 2003); *H. pylori* es una bacteria del tracto gastrointestinal, siendo así el principal agente etiológico de la gastritis crónica superficial y de otras enfermedades (Cervantes, 2006).

Tomando en cuenta estos hallazgos, se ha propuesto la incorporación de la tecnología del ozono (desinfectante primario) al proceso de desinfección, en combinación con el cloro (desinfectante secundario) con el fin de garantizar la calidad microbiológica del agua para consumo, además de conservar las características organolépticas de sabor y olor agradable y minimizar la formación de subproductos nocivos a la salud (PUMAGUA, 2010). Como un primer acercamiento, se han realizados estudios escala laboratorio para evaluar las condiciones de desinfección para ese sistema combinado O_3 -NaOCl (Castro, 2011). Se hicieron estudios de transferencia de masa y el dimensionamiento de una cámara de contacto para la desinfección del agua de abastecimiento de Ciudad Universitaria (Nava y Olivares, 2011). Con el presente trabajo de tesis, se busca evaluar las características de un sistema de desinfección secundaria utilizando hipoclorito de sodio para mantener los niveles de cloro residual libre en la red de distribución.

Marco teórico

Dentro de este capítulo se presenta la teoría necesaria para entender el proceso de desinfección de agua mediante la desinfección con cloro.

4. Desinfección de agua para consumo humano

La desinfección es una etapa indispensable para la potabilización del agua y cuyo objetivo es la inactivación de microorganismos patógenos (infecciosos) presentes en el medio, evitando que éstos causen daño a la salud de los consumidores.

Existen diferentes métodos para dicho fin, entre ellos:

- ✓ Desinfección con cloro (Cloración).
- ✓ Desinfección con ozono (Ozonación).
- ✓ Desinfección con radiación ultravioleta.
- ✓ Desinfección con métodos alternativos, como son la desinfección solar, la filtración lenta, la microfiltración y la desinfección con halógenos.

Para fines de este trabajo solo se mencionara el sistema de desinfección a base de cloro (Cloración), en los siguientes apartados.

4.1. Microorganismos patógenos

Los principales contaminantes biológicos del agua son microorganismos patógenos de origen fecal, las rutas de infección de estos microorganismos son a través de la ingesta de agua, alimentos o el contacto directo.

Los microorganismos patógenos de origen fecal, como su nombre lo indica provienen de desechos humanos que son portadores de estos y de animales de sangre caliente incluyendo las aves, causando generalmente enfermedades del sistema digestivo, como son: diarrea, fiebre tifoidea, paratifoidea, disentería, helmintiasis, cólera y hepatitis infecciosa.

Algunos ejemplos de microorganismos patógenos infecciosos que se encuentran contaminando el agua son:

- ✓ Virus
- ✓ Bacterias
- ✓ Protozoarios
- ✓ Helmintos

4.2. Consideraciones generales para la desinfección

Fuente de abastecimiento. El agua proveniente de la fuente de abastecimiento debe ser caracterizada antes de realizar estudios de evaluación de desinfectantes.

Naturaleza y número de microorganismos presentes en el agua. La eficiencia de la desinfección es afectada por la naturaleza y la población de microorganismos; de acuerdo a la Ley de Chick, el grado de desinfección es proporcional al número de microorganismos y a la concentración del desinfectante, esto para una temperatura y pH constantes.

Temperatura. Al existir un incremento en la temperatura, aumenta la velocidad de inactivación, debido a que está en función del tiempo para inactivar a los microorganismos, relación de Arrhenius.

Tipo y concentración del desinfectante utilizado. La eficiencia de los agentes físicos como el calor o el sol depende de su intensidad, mientras que en los agentes químicos su eficiencia depende de la concentración de estos.

Tiempo de contacto entre el desinfectante y el agua. Se ha observado que para una concentración dada de desinfectante, mientras mayor sea el tiempo de contacto mayor será la eficiencia de desinfección, Ley de Chick.

Turbiedad. Elevados niveles de turbiedad pueden proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección y estimular la proliferación de bacterias.

4.3. Desinfección con Cloro (Cloración)

El cloro es el desinfectante más utilizado a nivel mundial para la desinfección de agua para consumo humano; en la tabla 7 se observan algunas propiedades fisicoquímicas de este compuesto.

Tabla 7 Propiedades físicas y químicas del cloro.

Propiedad	Valor
Estado de agregación	Gas
Color (condiciones ambientales)	Amarillo verdoso
Olor	Irritante
Peso molecular (uma)	35.357
Punto de fusión (°C)	-101.4
Punto de ebullición (°C)	-34.5
Densidad relativa al aire	2.5
Corrosión	Alta

Los compuestos clorados presentan un efecto residual que otros desinfectantes no aportan. El efecto residual se define como la cantidad sobrante de cloro después de la demanda satisfecha (CONAGUA, 2007).

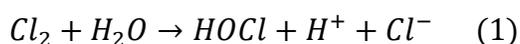
El cloro actúa como germicida afectando la integridad de la membrana, ocluye su permeabilidad en los agentes patógenos, alterando funciones celulares (daña enzimas y ácidos nucleídos (Berg et al., 1986). Es por ello que la resistencia de los microorganismos ante el cloro esta dado por la resistencia de sus membranas.

4.3.1. Mecanismo de desinfección

La cloración se puede llevar a cabo mediante diferentes compuestos clorados como el cloro gas (Cl_2), el hipoclorito de sodio ($NaOCl$) y hipoclorito de calcio ($Ca(OCl)_2$).

El cloro en cualquiera de sus formas al entrar en contacto con el agua se hidroliza formando ácido hipocloroso ($HOCl$); que es la especie desinfectante, esta se disocia en iones hidrógeno (H^+) e hipoclorito (OCl^-) y adquiere propiedades oxidantes, estas dos especies resultantes tienen propiedades microbicidas.

Producción de ácido hipocloroso ($HOCl$) a partir de cloro gas (Cl_2)



Producción de ácido hipocloroso ($HOCl$) a partir de hipoclorito de sodio ($NaOCl$)

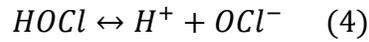


Producción de ácido hipocloroso ($HOCl$) a partir de hipoclorito de calcio $Ca(OCl)_2$



4.3.2. Ácido hipocloroso ($HOCl$)

Como ya se menciona en la desinfección con cloro la especie microbicida es el ácido hipocloroso ($HOCl$), es un ácido débil (pK_a : 7.5), lo que significa que se disocia moderadamente en agua. La ecuación 4 muestra la reacción de ionización del ácido hipocloroso, este ácido se ioniza o disocia en iones hidrógeno e hipoclorito.



El grado de disociación del ácido hipocloroso y el ion hipoclorito dependen de la temperatura y del pH de la solución, la figura 7 muestra el porcentaje de disociación entre el HOCl y el OCl⁻. La eficiencia de desinfección del HOCl es mayor a la del OCl⁻ (de 40 a 80 veces mayor), por lo que se prefiere la cloración a pH's ácidos. Su efectividad aumenta con el tiempo de contacto; un tiempo de contacto pequeño se compensa con una dosis mayor de desinfectante, el ácido hipocloroso y el ion hipoclorito son considerados como cloro residual libre.

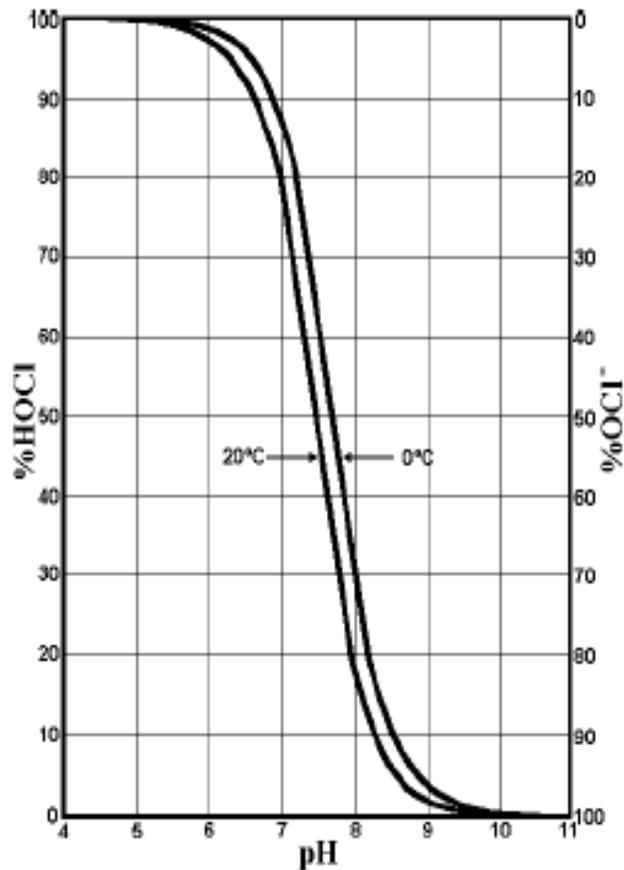


Figura 7 Porcentaje de disociación entre el ácido hipocloroso y el ion hipoclorito, en función de la temperatura y del pH.

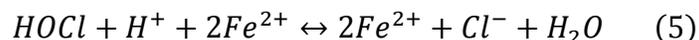
4.3.3. Reacción del cloro con sustancias presentes en el agua

El cloro es un elemento muy activo, por lo que tiende a reaccionar con una amplia variedad de sustancias que están presentes en el agua; es por ello que la cantidad a utilizar durante la cloración, es resultado de estas diversas reacciones y del valor residual que se desea mantener. Las reacciones del cloro con los constituyentes del agua se pueden agrupar de la siguiente manera.

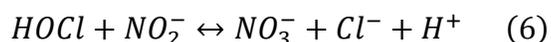
- Reacciones con compuestos inorgánicos
- Reacciones con amoníaco
- Reacciones con compuestos orgánicos

Reacciones con compuestos inorgánicos.

Las reacciones entre el cloro y los compuestos inorgánicos reducidos, tales como manganeso (Mn (II)), hierro (Fe (II)), nitritos (NO_2^-) y azufre (S (-II)), por lo general son de tipo redox y son reacciones rápidas, por ejemplo la ecuación (5) muestra el caso del Fe (II).



La reacción de cloro con manganeso (Mn (II)), nitritos (NO_2^-) y azufre (S (-II)) siguen este patrón, excepto la reacción con Mn (II) que solo se lleva a cabo a un pH mayor de 8.5. La ecuación (6) muestra la reacción de los nitritos con cloro.



Reacciones con amoníaco.

La presencia de amoníaco es resultado de la descomposición de la materia orgánica y la urea que se encuentra en forma ocasional en aguas naturales, de igual forma las aguas negras y los efluentes de las plantas de tratamiento contienen cantidades significativas de nitrógeno. El cloro reacciona con el

amoníaco para producir una serie de compuestos llamados cloraminas (ver tabla, 8).

Tabla 8 Compuestos clorados provenientes de amoníaco.

Nombre	Fórmula	Mecanismo de reacción
Monocloramina	NH_2Cl	$\text{NH}_{3(\text{ac})} + \text{HOCl} \leftrightarrow \text{NH}_2\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$
Dicloramina	NHCl_2	$\text{NH}_2\text{Cl} + \text{HOCl} \leftrightarrow \text{NHCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Tricloramina o tricloruro de nitrógeno	NCl_3	$\text{NHCl}_2 + \text{HOCl} \leftrightarrow \text{NCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Finalmente el cloro oxida al amoníaco a nitrógeno gas (N_2) o a una variedad de productos que contienen nitrógeno y están libres de cloro tales como hidracina (N_2H_4), hidroxilamina (NH_2OH), óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO), nitrito (NO_2^-), tetróxido de nitrógeno (N_2O_4) y nitrato (NO_3^-).

El mecanismo de reacción y formación de compuestos clorados de amonio es complejo, y los productos varían con las condiciones de pH, la temperatura, relación cloro añadido y el amoníaco presente y del tiempo de contacto. Las especies predominantes en la mayoría de los casos son las monocloraminas y las dicloraminas, las cuales presentan propiedades microbicidas aunque en menor grado comparado con el ácido hipocloroso; las cloraminas son consideradas como cloro residual combinado.

Reacciones con compuestos orgánicos.

El cloro reacciona fácilmente con compuestos orgánicos, sustituye un átomo de hidrógeno formando compuestos clorados, de igual forma el cloro se puede incorporar a una molécula por adición o bien puede reaccionar con un compuesto para oxidarlo sin clorarlo.

Reacciones con nitrógeno orgánico. El cloro reacciona con muchos compuestos orgánicos de nitrógeno y amoníaco, por ejemplo las aminas orgánicas que contienen el grupo $-\text{NH}_2$, $-\text{NH}$ o $-\text{N}=\text{}$ como parte de su molécula, suelen ser comunes, la reacción elemental con metilamina (CH_3NH_2) es típica de estas aminas, ecuación (7).



Reacciones con fenoles. El cloro reemplaza al hidrógeno rápidamente en el fenol y los compuestos que contienen al grupo fenólico.

Formación de trihalometanos. Los trihalometanos (THMs) se forman a partir de la sustitución de 3 átomos de hidrógeno del metano (CH_4), por átomos de un halógeno (cloro, bromo y eventualmente yodo). La ecuación (8) muestra la ecuación general de la formación de los THM's, entiéndase por precursor a la materia orgánica.



Los THMs formados como producto de la desinfección son: Cloroformo (CHCl_3), Bromodiclorometano (CHCl_2Br), Dibromoclorometano (CHClBr_2) y Bromoformo (CHBr_3). Es necesario precisar que los niveles de THMs son mayores en aguas superficiales que en aguas subterráneas cloradas, esto debido a los niveles de materia orgánica presente. Su producción depende de factores tales como la temperatura, el tiempo de contacto, el pH y la dosificación de cloro.

4.3.4. Cloración a punto de quiebre (breakpoint)

Como ya se mencionó el cloro es un elemento que reacciona fácilmente con otros compuestos, estas reacciones consumen parte del cloro antes de que actúe como desinfectante, es por ello que la cantidad de cloro a dosificar durante la desinfección debe ser una dosis adecuada para cubrir el consumo de cloro por las reacciones anteriormente descritas y del residual de cloro a formar.

Es por ello que la *demanda de cloro* está definida como la cantidad de cloro que consumen las sustancias reductoras y la materia orgánica. Matemáticamente se puede expresar de la siguiente forma (ecuación 9):

$$\text{Demanda de cloro} = \text{Cloro agregado (dosis de cloro)} - \text{Cloro residual total} \quad (9)$$

La dosis de cloro es la cantidad mínima necesaria de cloro activo para eliminar las bacterias del agua en el nivel deseado, después de que el cloro haya reaccionado con las sustancias presentes (CONAGUA, 2000), para la determinación de esta, es necesario tomar en cuenta los siguientes factores:

- Organismos que se intenta inactivar
- Tiempo disponible entre el punto de cloración y el abastecimiento a los consumidores
- Tipo de desinfectante a formar en el agua (Ácido hipocloroso o cloraminas)
- Fuente de abastecimiento
- Condiciones del agua a desinfectar (pH, temperatura, turbiedad, contenido de especies reductoras, contenido de nitrógeno y materia orgánica)

Para determinar la dosis óptima de cloro, se deben realizar pruebas de laboratorio agregando diferentes dosis a una muestra de agua a desinfectar y midiendo su concentración a través del tiempo (figura 8), de los resultados obtenidos la dosis

óptima será la que produzca un residual de cloro libre de 0.2-1.5 mg/L en el caso de un agua para consumo humano (NOM-127-SSA1-1994).

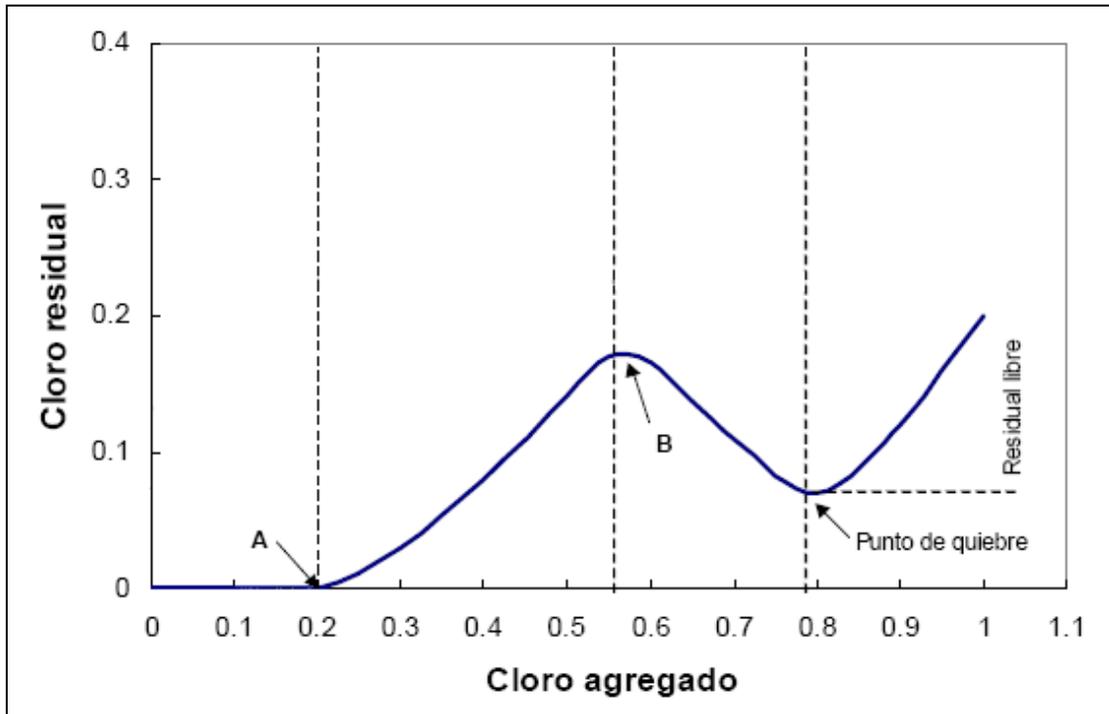


Figura 8 Curva de cloración a punto de quiebre (breakpoint).

Donde:

- Punto A: El cloro añadido reacciona con la materia oxidable, reduciéndose a ión cloruro
- Intersección A-B: Formación de cloraminas y compuestos orgánicos clorados (cloro residual combinado)
- Punto B: Máxima formación de compuestos clorados
- Intersección B-Punto de quiebre: Formación de productos libres de cloro, el cloro se reduce a ión cloruro
- Punto de quiebre: Formación de cloro libre y presencia de compuestos clorados

De igual forma el cloro residual está definido como la cantidad de cloro sobrante después de que la demanda ha sido cubierta, el cloro residual libre se encarga de llevar a cabo el proceso de desinfección. Existen tres tipos de cloro residual los cuales se describen a continuación (CONAGUA, 2007):

Cloro residual combinado. Como ya se mencionó el cloro combinado con compuestos nitrogenados forma cloraminas, la formación de estas depende de la cantidad de ácido hipocloroso y amoníaco presente del agua, además el pH y la temperatura son factores importantes.

Cloro residual libre. Está definido como el cloro elemental que no está combinado con otro compuesto y el ácido hipocloroso, el cloro residual libre tiene mayor eficacia en la desinfección que la forma combinada.

Cloro residual total. Es la suma del residual combinado y el residual libre.

Durante la desinfección el cloro residual libre y el residual combinado pueden estar presentes, la proporción en que estos se encuentran dependerá de la cantidad de amoníaco presente en el agua.

4.4. Formas de suministro de cloro

4.4.1. Gas cloro

El cloro gas es utilizado en grandes plantas potabilizadoras del orden de 500,000 litros diarios, debido a que es económicamente atractivo. El sistema básico está constituido por un cilindro de cloro, un regulador de vacío, un inyector de cloro gas y un tubo o tanque de contacto. Las instalaciones de cloro gas presentan dos métodos de alimentación hacia la red de distribución.

- Alimentador de solución. Esta mezcla de gas en un volumen pequeño de agua favorece la dispersión completa y rápida en el punto de aplicación.

- Alimentación directa. El gas se alimenta directamente en el punto de aplicación, este método se utiliza en sistemas de abastecimientos pequeños y rurales

4.4.2. Hipoclorito de sodio (NaOCl) líquido

El NaOCl es una solución alcalina con aproximadamente 13% de cloro activo, tiene una coloración amarillenta y un olor característico, es altamente corrosivo por lo que no se debe almacenar más de un mes. Se encuentra disponible en el mercado, y es producido a partir de la reacción entre el cloro gas y el hidróxido de sodio en solución.

El proceso general de cloración con hipoclorito de sodio está constituido por dos bombas, un tanque para la solución, un difusor y mangueras; en este proceso la solución de hipoclorito de sodio se diluye con agua en un tanque de mezclado, la solución diluida de NaOCl se inyecta mediante bombeo al sistema de abastecimiento a una tasa controlada.

Para la dosificación de cloro se puede utilizar dosificadores bajo presión atmosférica y dosificadores bajo presión positiva o negativa.

Dosificadores bajo presión atmosférica. Entre estos destacan el tanque con válvula flotador, sistema de tubo con orificio en flotador y el sistema vaso/botella, estos funcionan bajo el principio de carga hidráulica constante; la implementación de estos dosificadores es muy simple, el rango de aplicación es para comunidades pequeñas.

Dosificadores bajo presión positiva o negativa. Una bomba de diafragma es utilizada para un caso de presión positiva, está hecho de un material resistente a los efectos corrosivos de las soluciones de hipoclorito, el punto de aplicación puede ser un canal, un reservorio o una tubería con agua a presión.

Dosificadores bajo presión negativa, para ello se utiliza un dispositivo Venturi, el cual permite dosificar soluciones cloradas en tuberías presurizadas, el vacío

creador por el flujo del agua a través de un tubo Venturi succiona la solución de hipoclorito y la descarga directamente en la corriente de agua principal.

4.4.3. *Hipoclorito de calcio*

El hipoclorito de calcio es un fuerte oxidante, por lo que este siempre se aplica en solución y puede ser aplicado utilizando equipo de bombas dosificadoras o montaje local; existen dos presentaciones para las soluciones de hipoclorito: hipoclorito de calcio de alta concentración y el hipoclorito de sodio de baja concentración.

4.5. *Desinfección secundaria*

La desinfección primaria es un proceso en el tratamiento de potabilización del agua con la cual se logra la inactivación de microorganismos patógenos, mientras que la *desinfección secundaria* tiene por objetivo mantener una concentración de desinfectante residual en el agua que previamente fue tratada, evitando así una nueva contaminación por microorganismos patógenos.

La cloración secundaria (post cloración o recloración) consiste en adicionar una cantidad de cloro en las redes de distribución para mantener una concentración de residual a lo largo de la red de distribución; durante la cloración secundaria el cloro tiene el mismo comportamiento que una cloración primaria.

Para ello se puede utilizar cloro libre (Cl_2 , HOCl , OCl^-) o cloro residual combinado (cloraminas); la cloración secundaria se utiliza cuando los sistemas de distribución son complejos, para sistemas de distribución de gran longitud, cuando se cuenta con sistemas de almacenamiento de gran tamaño, cuando existen problemas de contaminación microbiológica en las redes de distribución o cuando el desinfectante utilizado durante la desinfección primaria no tiene un efecto residual, por ejemplo cuando el desinfectante primario es ozono.

Del muestreo continuo de cloro residual libre en sitios específicos de la de red distribución se obtiene evidencia del aumento o disminución de este, de igual forma nos permite establecer puntos críticos en la red de distribución, es decir, identificar aquellos sitios de la red de distribución donde el cloro no está llegando y como consecuencia de esto nos permite establecer sitios de recloración.

Metodología

Dentro de este capítulo se describen las bases del programa de monitoreo utilizado para evaluar la calidad del agua potable en la red de distribución de Ciudad Universitaria, de igual forma se describen las técnicas utilizadas para realizar las pruebas en campo y en laboratorio de los parámetros descritos a continuación.

5. Monitoreo de la calidad de agua en la red de distribución de Ciudad Universitaria

5.1. Programa de monitoreo

Para poder llevar a cabo el monitoreo de la calidad del agua potable, en particular la cuantificación de los niveles de cloro residual libre y la calidad microbiológica, fue necesario conformar un programa de monitoreo para la red de distribución del Campus Universitario.

El diseño se basó en cuatro ejes principales:

- ⁵Normas oficiales mexicanas NOM-127-SSA1-1994, NOM-179-SSA1-1998 y NOM-230-SSA1-2002
- Aplicación de un muestreo probabilístico sistemático para la selección primaria de puntos representativos de la red de distribución
- Criterios empíricos de muestreo y calidad de agua
- Resultados experimentales de monitoreos previos en la red

⁵Nom-127-SSA1-1994 (modificada), límites máximos permisibles para contaminantes presentes en el agua para uso y consumo humano; NOM 179-SSA-1998, establece las actividades a realizar durante un monitoreo de calidad de agua, por ejemplo la frecuencia de monitoreo para diferentes contaminantes en base a la población abastecida y la NOM-230-SSA1-2002 es una guía práctica para llevar a cabo un monitoreo de agua para uso y consumo humano.

5.1.1. Número de sitios de muestreo y frecuencia

El número de sitios de muestreo y la frecuencia de monitoreo fue establecida con base al tamaño de la población abastecida de acuerdo con la NOM-179-SSA-1998. Ciudad Universitaria cuenta con una población cercana a 136,000 personas, incluyendo estudiantes, académicos y personal administrativo; si se toma en cuenta a los visitantes diarios, la población asciende aproximadamente a 150, 000 personas (PUMAGUA, 2011).

Con base en este tamaño de población se fijó un mínimo de 15 puntos de muestreo, de acuerdo a lo recomendado por la norma, los cuales son necesarios para evaluar los niveles de cloro libre residual entre otros parámetros indicadores de calidad (ver tabla 9).

Tabla 9 Frecuencia y número de muestras para el monitoreo de cloro residual libre (NOM-179-SSA1-1998).

Determinación de cloro residual libre en la red de distribución.		
Población abastecida No. de habitantes	Muestras por número de habitantes	Frecuencia
$\leq 2\ 500$	1/ $\leq 2\ 500$	Semanal
2 501 – 50 000	1/ 5 000	
50 001 – 500 000	5/ 50 000	
> 500 000	1/ 50 000	Diaria

Selección primaria de puntos de muestreo (muestreo probabilístico)

En una primera etapa de selección de posibles sitios de muestreo se consideró una lista de 136 dependencias (DGSM, 2009), las cuales son abastecidas por la red de distribución de agua. Con la finalidad de seleccionar puntos representativos de la red, se aplicó un muestreo probabilístico sistemático que consiste en realizar una selección aleatoria de los elementos de la muestra en la que todos tienen

igual probabilidad de ser seleccionados y su elección es independiente. En la Figura 9, se resumen los diferentes tipos de muestreos probabilísticos y sus características. El muestreo probabilístico sistemático fue elegido para esta tesis debido a que ya se contaba con el número de integrantes de la población (136 dependencias) y un número de integrantes de muestra (15 muestras), respectivamente lo que facilitó el cálculo del número de elevación requerido por este tipo de muestreo, aplicando la ecuación 10, como se describe a continuación.

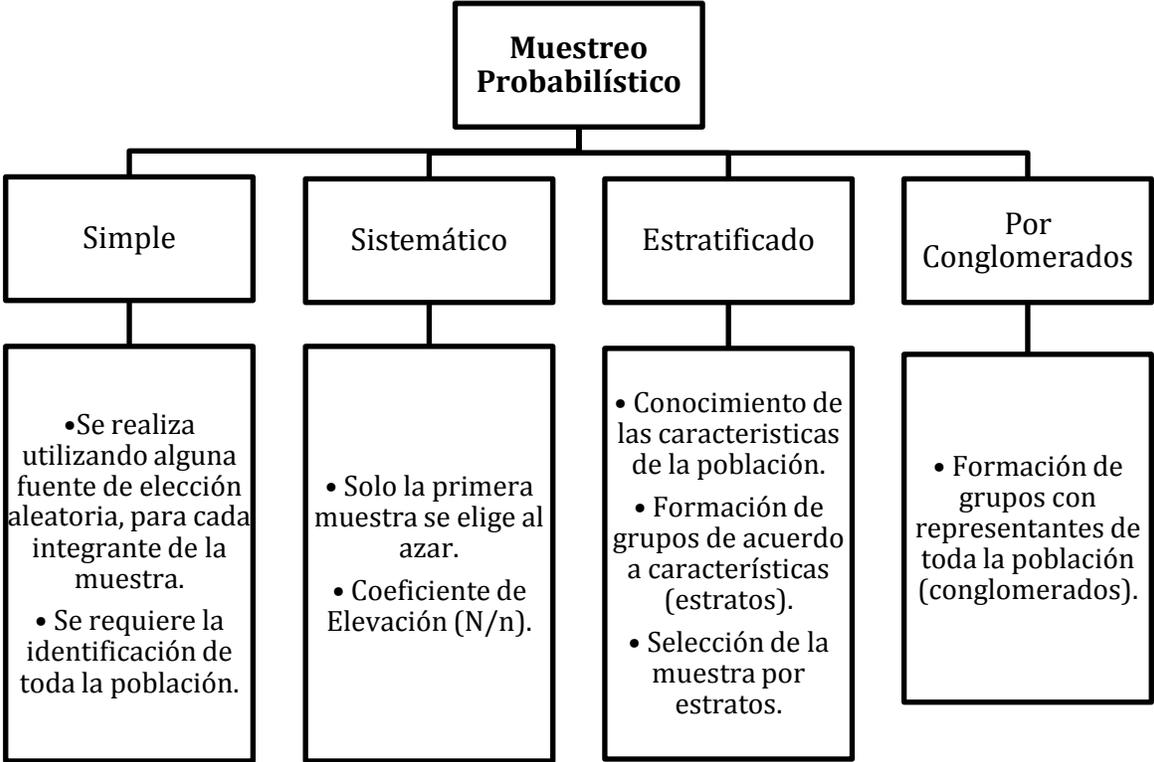


Figura 9 Tipos de muestreo probabilístico.

$$\#_{elevación} = \frac{N}{n} \tag{10}$$

Donde:

- $\#_{elevación}$: Número de elevación.
 N : Número de integrantes de la población.
 n : Número de integrantes de la muestra.

La ecuación 11 muestra el número de elevación para el caso de la población de Ciudad Universitaria.

$$\#_{elevación} = \frac{N}{n} = \frac{136}{15} = 9.06 \quad (11)$$

El siguiente paso consistió seleccionar al azar el primer integrante de la muestra, este valor debe ser superior al número de elevación calculado (9.06). La institución o número elegido corresponde al inicio de la lista y a partir de este punto, fue sumado el número de elevación para obtener el siguiente integrante de la muestra y así sucesivamente, hasta obtener los 15 puntos de muestreo. El número de institución elegido al azar fue la número 11 de la lista (Centro Universitario de Teatro, CUT) y correspondió al primer integrante de la muestra seleccionado. En el anexo 3 se incluye el listado completo de las 136 dependencias del Campus Central en el orden en que estas se encuentran registradas por la DGSM (Dirección General de Servicios Médicos).

De esta manera se obtuvo una primera selección de 15 posibles sitios de monitoreo:

1. Centro universitario de teatro, CUT
2. Departamento de salud ambiental, DGSM
3. Dirección de teatro y danza
4. Dirección general de comunicación social, DGSC
5. Dirección general de proveeduría y almacenes
6. Edificio de cómputo para la investigación, CiiD
7. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, FCPyS
8. Facultad de Medicina

9. Gimnasio y frontón cerrado
10. Instituto de Geofísica
11. Instituto de Investigaciones en Materiales
12. Instituto de investigación en matemáticas aplicadas y sistemas, IIMAS
13. Salas de cine
14. Tienda de autoservicio (Tienda UNAM)
15. Zona comercial de ciudad universitaria

Adicionalmente a estos puntos seleccionados, se decidió considerar sitios de muestreo que fueron monitoreados en estudios previos (PUMAGUA, 2010) para dar seguimiento a la calidad del agua y estos fueron:

1. Base 1
2. Postgrado de Odontología
3. Dirección General de Administración Escolar, DGAE
4. Centro de Ciencias de la Atmosfera
5. Base 6 (Base PUMABUS)
6. Universum
7. Dirección General del Patrimonio Universitario
8. Tienda de autoservicio (Tienda UNAM)
9. Tanques de almacenamiento

De esta segunda lista, solo uno de los puntos coincidió con los obtenidos del muestreo probabilístico y corresponde a la Tienda UNAM.

Selección final de puntos de muestreo

Para acotar el número de sitios de muestreo se hizo una segunda selección tomando como base los siguientes criterios:

- *Distancia de recorrido del agua y sector hidráulico al que pertenecen.* La selección considero puntos cercanos a los tanques de almacenamiento,

puntos intermedios y los extremos de la red, así el sector hidráulico al que estos pertenecen.

- *Puntos prioritarios para la toma de muestra.* Toma principal de agua de cada edificio, registros con manómetros, llaves de riego, descarga de agua a cisternas, tomas de agua al interior del edificio libre de cisternas o filtros.
- *Accesibilidad de los sitios de monitoreo.* Se dio prioridad a aquellos sitios de fácil acceso a los puntos prioritarios de toma de muestra, tanto por razones físicas como por los trámites requeridos por la dependencia.
- *Representatividad de la red de distribución.* Se seleccionaron un mínimo de 15 puntos (NOM-179-SSA-1998), algunos fueron sustituidos en función de los criterios anteriores. De manera empírica se seleccionaron adicionalmente tres puntos en función de los resultados obtenidos durante el desarrollo del programa de monitoreo.

Aplicando los criterios anteriores se llevó a cabo la selección final de los siguientes sitios de monitoreo.

La Dirección General de Proveduría y Almacenes fue sustituida por el Taller de Conservación debido a la similitud en la distancia de recorrido del agua y a la accesibilidad del sitio. El mismo criterio fue aplicado en el caso de la DGSC (rectoría), Zona Comercial de CU y la DGSM, donde se optó por seleccionar a la DGSM como punto representativo de esta zona de la red de distribución. De los puntos que se encuentran en los extremos de la red tales como la DGAE, Ciencias de la Atmósfera, la Base 6 (o Base PUMABUS), el Postgrado de Odontología y el Instituto de Geofísica, se seleccionaron los tres primeros por la facilidad de acceso al sitio y su representatividad en términos de la distancia de recorrido del agua. La Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, que tiene registrados dos edificios independientes, se seleccionó el edificio de FCPyS por su cercanía a la toma principal de agua. El CUT, la Dirección de Teatro y Danza, las Salas de Cine, son sitios que se encuentran cercanos y consecutivos, por lo que se seleccionaron sólo los dos primeros en función de la distancia de recorrido del agua.

Los sitios seleccionados finalmente para el programa de monitoreo de la red de distribución se enlistan en la tabla 10, sumando un total de 16 puntos. Adicionalmente y para fines comparativos se buscó obtener muestras representativas del agua de los tanques de almacenamiento, para ello se consideraron dos puntos cercanos a dichos tanques (tabla 11). La figura 10 muestra su ubicación dentro del Campus Universitario. Los puntos de color amarillo resultaron seleccionados a partir del muestreo probabilístico, los de color azul son sitios previamente estudiados y los blancos a los tanques.

Tabla 10 Selección final de sitios de monitoreo en la red de distribución.

Sector Hidráulico	Dependencia	Tanque de abastecimiento	Recorrido de agua (m)	Sitio de monitoreo
1	Base 1	Tanque bajo	1968.43	R-60 Manómetro
	F. Medicina		2187.12	Aspersor
	IIMAS		1881	Aspersor
	DGAE		2904.84	Llave de servicio
	Ciencias de la Atmósfera		3048.05	Llave de servicio
	Base PUMABUS		3505.28	Llave de servicio
2	DGSM		587.63	Llave de servicio
3	Tienda UNAM	Pozo Multifamiliar	2714.55	Cisterna
	I. Materiales		2120.61	Llave de servicio
	Frontón Cerrado		1071.77	Llave de servicio
4	T. Conservación	Tanque alto	1161.84	Cisterna
5	FCPyS	Tanque vivero alto	3458.86	Aspersor
	CUT		2598.96	Aspersor
	Teatro y Danza		2752.39	Aspersor
	Universum		2290.01	Cisterna
	Patrimonio		2262.02	Llave de servicio

Tabla 11 Selección final de sitios de monitoreo en los tanques de almacenamiento.

Tanque de almacenamiento	Punto de muestreo
Tanque Alto	Estación de Bomberos
Tanque Bajo	
Tanque Vivero Alto	Pozo Vivero Alto

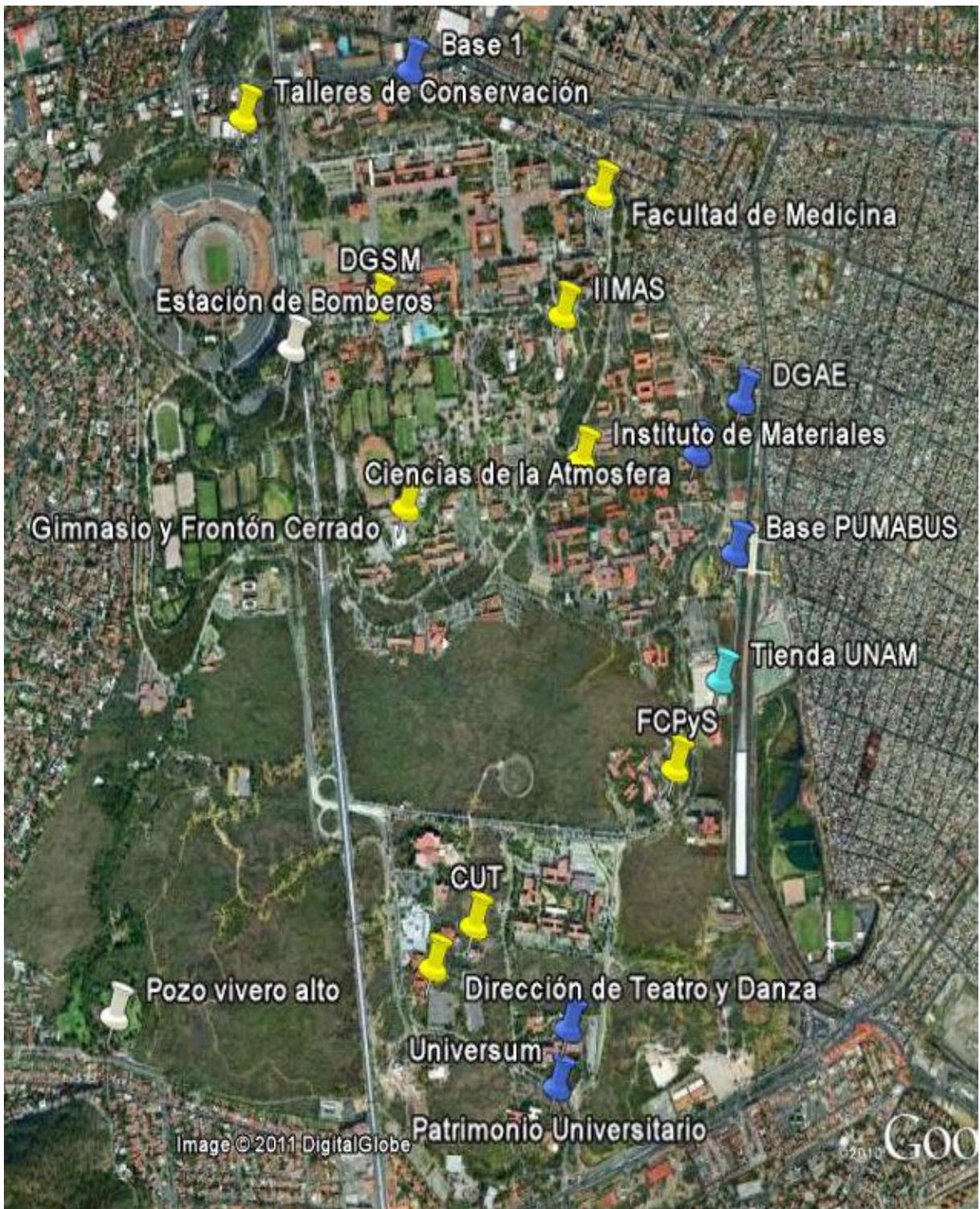


Figura 10 Sitios de monitoreo en CU.

5.2. Calendario de monitoreo

Los muestreos se realizaron los días martes y jueves, a partir de las 10:30 horas con una duración aproximada de 3 hrs. Los martes se muestrearon los sitios ubicados en los sectores hidráulicos 4 y 5, los jueves los de los sectores 1, 2 y 3. El muestreo abarcó los meses de Marzo y Abril de acuerdo al calendario de la tabla 12.

Tabla 12 Calendario de muestreo.

	Lunes (día)	Martes (día)	Miércoles (día)	Jueves (día)	Viernes (día)
Marzo 2011		15 Muestreo		17 Muestreo	
		22 Muestreo		24 Muestreo	
		29 Muestreo		31 Muestreo	
Abril 2011		5 Muestreo		7 Muestreo	
		12 Muestreo		14 Muestreo	

5.3. Métodos de análisis de parámetros de calidad en la red de agua potable

Cloro residual libre

El cloro residual libre fue utilizado en este trabajo como un indicador de la eficiencia del sistema de desinfección (cloración) y de la calidad microbiológica del agua que se distribuye a la Comunidad Universitaria. Los niveles de concentración esperados en el agua de la red se encuentran en el intervalo de 0.2mg/L a 1.5mg/L, lo cual asegura una buena desinfección y previene la contaminación del agua, esto de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2000. Para la cuantificación de este parámetro se utilizó un método colorimétrico con DPD (dietil-p-fenilén diamina), la figura 11 resume el material utilizado para el desarrollo de la prueba en campo y la figura 12 muestra el procedimiento para la cuantificación de cloro residual libre en campo.

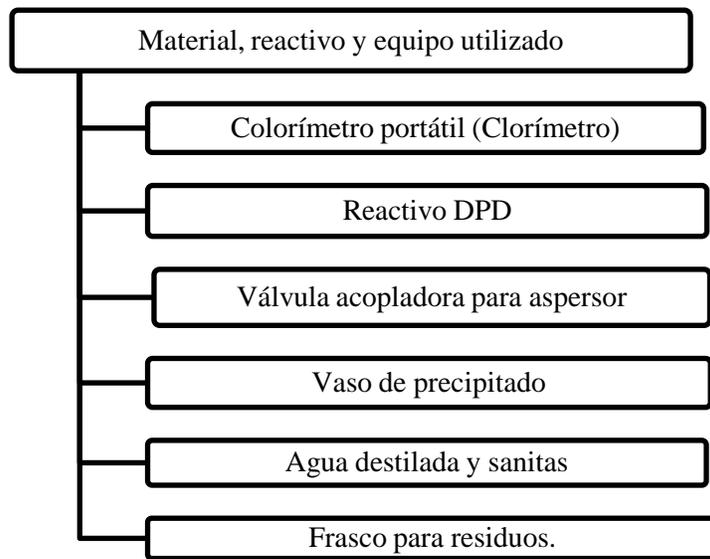


Figura 11 Material, reactivo y equipo resumido para la determinación de cloro residual libre en campo.

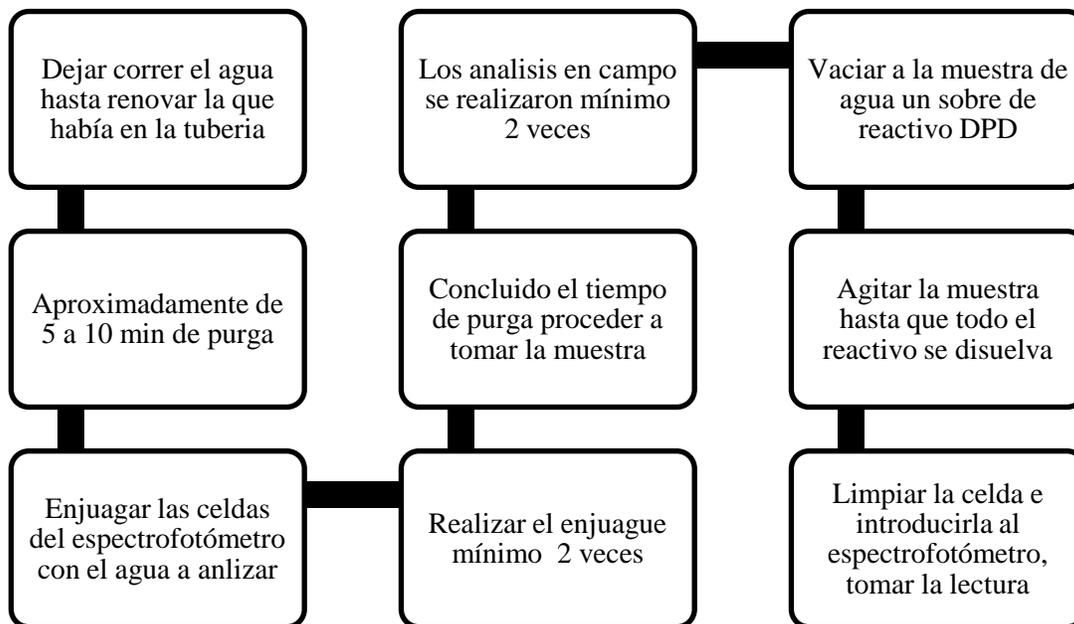


Figura 12 Procedimiento para la cuantificación de cloro residual en campo.

Análisis microbiológico

La calidad microbiológica del agua fue determinada con base en la cuantificación del contenido de bacterias Coliformes Fecales (CF) de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994; el límites máximo permitido es de 0 UFC/100 mL. Para ello se utilizó en método de filtración por membrana (apéndice informativo B, NOM-181-SSA1-1998). El muestreo de agua se realizó considerando los criterios recomendado por la NOM-230-SSA1-2002. Es preciso señalar que fue necesario hacer adecuaciones de la técnica de acuerdo a las necesidades de este muestreo. En las siguientes figuras se resumen los requerimientos (figura 13) y el procedimiento que utilizó en la presente tesis para llevar a cabo la toma de muestra (figura 14). De igual forma, la figura 15 resume los requerimientos para llevar a cabo los análisis microbiológicos y la figura 16 el procedimiento con el cual se realizaron los análisis microbiológicos utilizando Agar m-FC comercial (DIFCO).

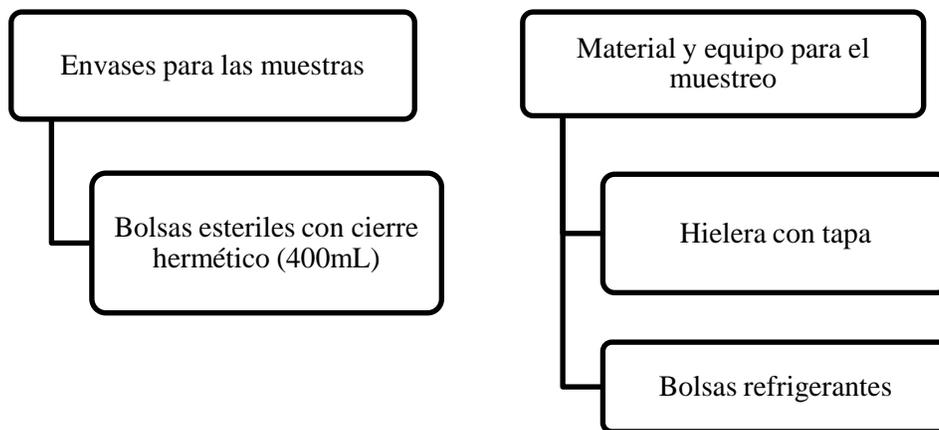


Figura 13 Material y equipo para realizar la toma de muestra de análisis microbiológicos.

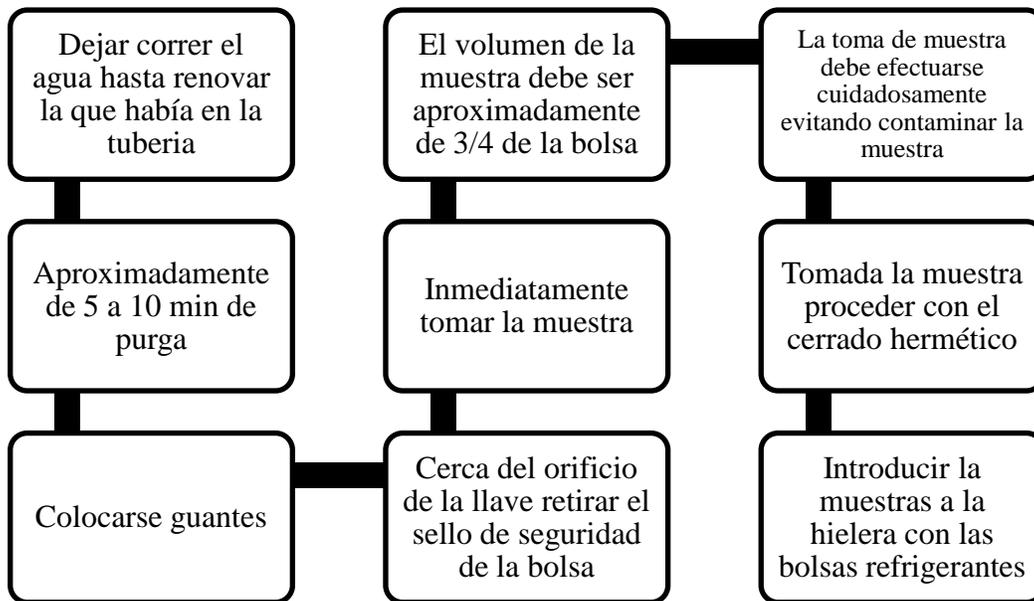


Figura 14 Procedimiento de toma de muestra para análisis microbiológicos.

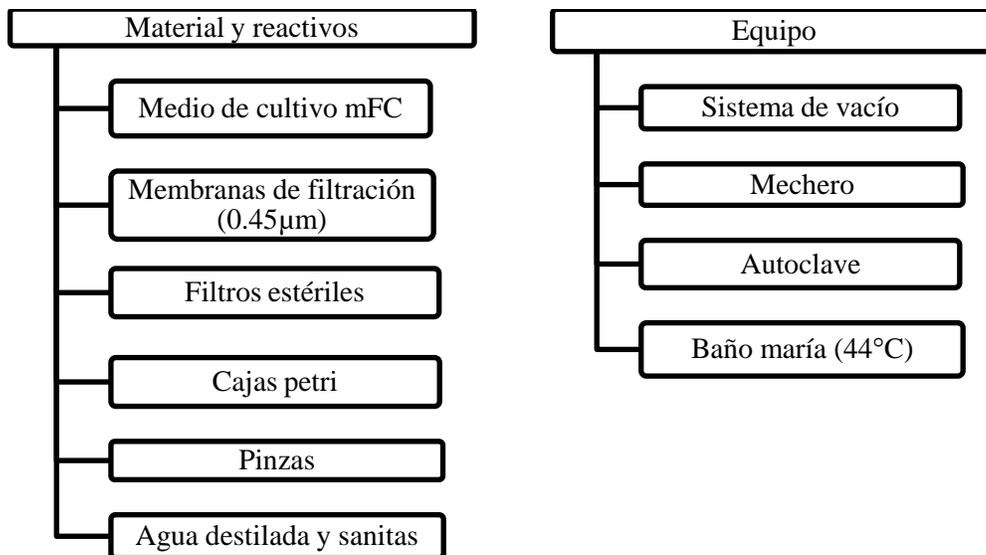


Figura 15 Material, reactivos y equipo para la elaboración de análisis microbiológicos.

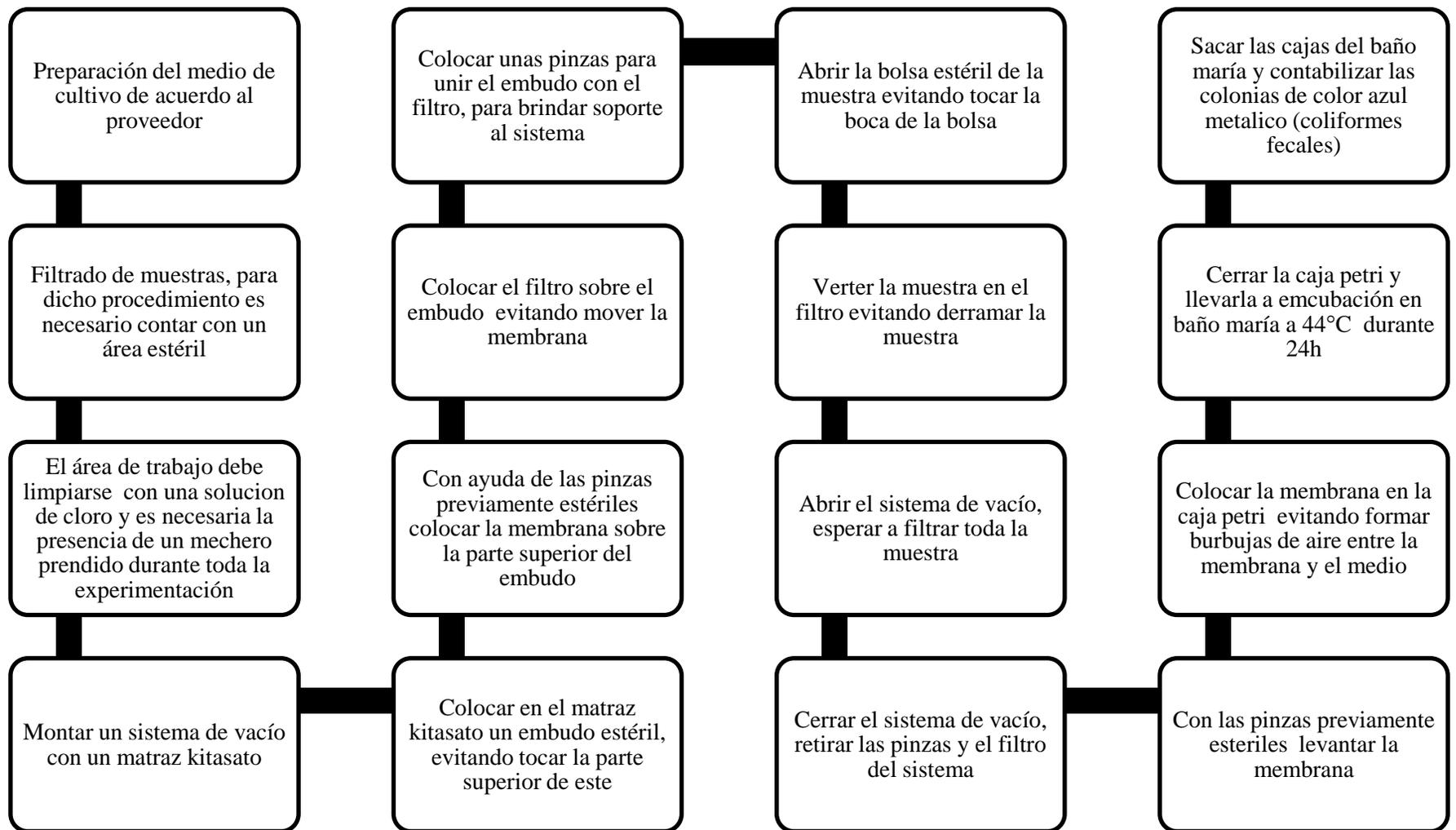


Figura 16 Técnica para el análisis microbiológico de coliformes fecales (NOM-181-SSA1-1998).

Análisis fisicoquímicos.

De igual forma se evaluaron parámetros indicadores de la calidad fisicoquímica del agua como son el pH, la turbiedad, SDT y NO_3^- , la figura 17 muestra los requerimientos para la toma de muestra, de igual forma la figura 18 muestra el procedimiento para la toma de muestra para análisis microbiológicos.

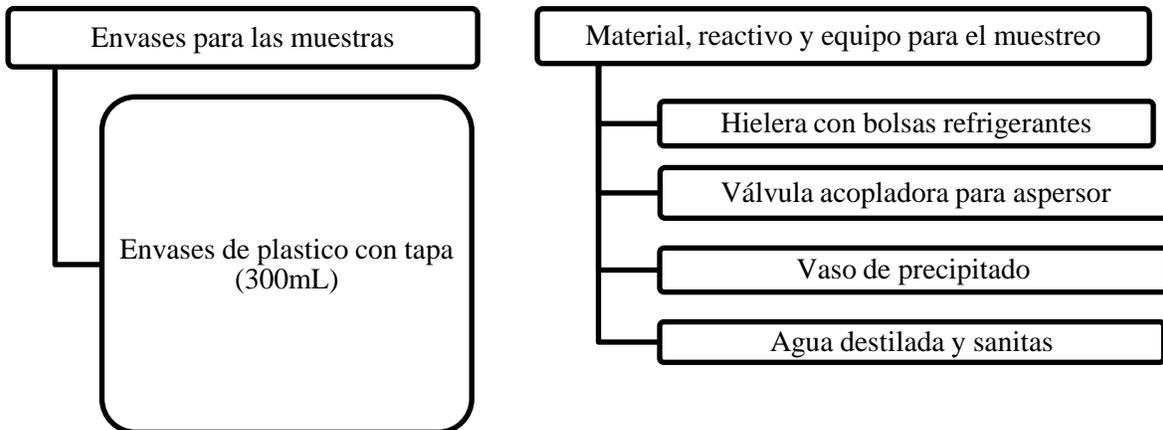


Figura 17 Material y equipo para la toma de muestra de análisis fisicoquímicos.

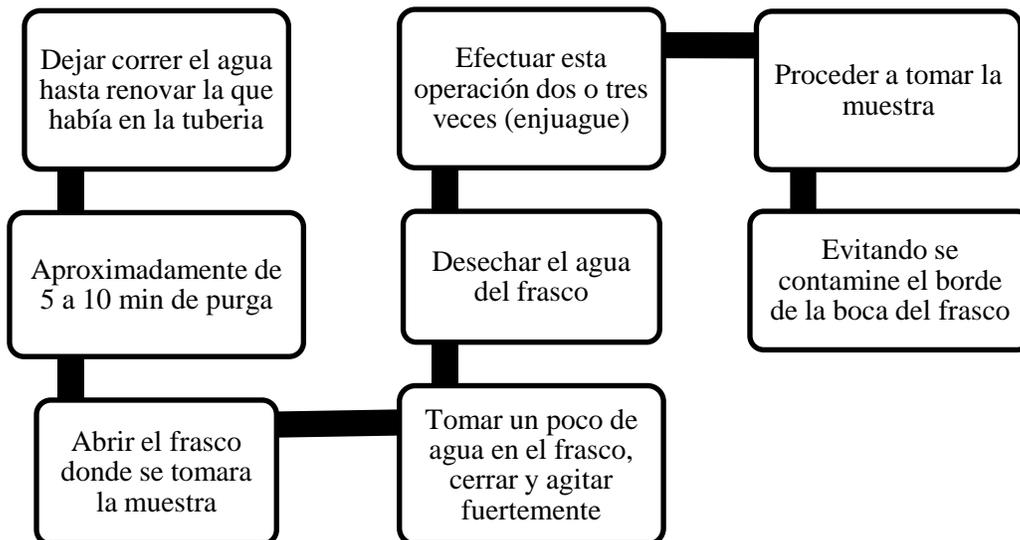


Figura 18 Procedimiento de toma de agua para análisis fisicoquímico.

Los análisis fisicoquímicos realizados para este trabajo fueron pH, Turbiedad (NTU), Sólidos disueltos totales (SDT) (mg/L) y Nitratos (NO_3^-) (mg/L), todos ellos tienen un límite máximo permisible en la NOM-127-SSA1-1994; la figura 19 muestra el material y los equipos utilizados para la determinación de dichos análisis y la figura 20 muestra el procedimiento para la determinación de los parámetros fisicoquímicos anteriormente mencionados; el pH se determinó a través de un potenciómetro que registra el valor de pH directo, la turbiedad se determinó a través de un turbidímetro que era previamente calibrado para después obtener el valor de la turbiedad, los SDT se determinaron a través de un conductímetro y los NO_3^- se determinaron a través de un método colorimétrico.

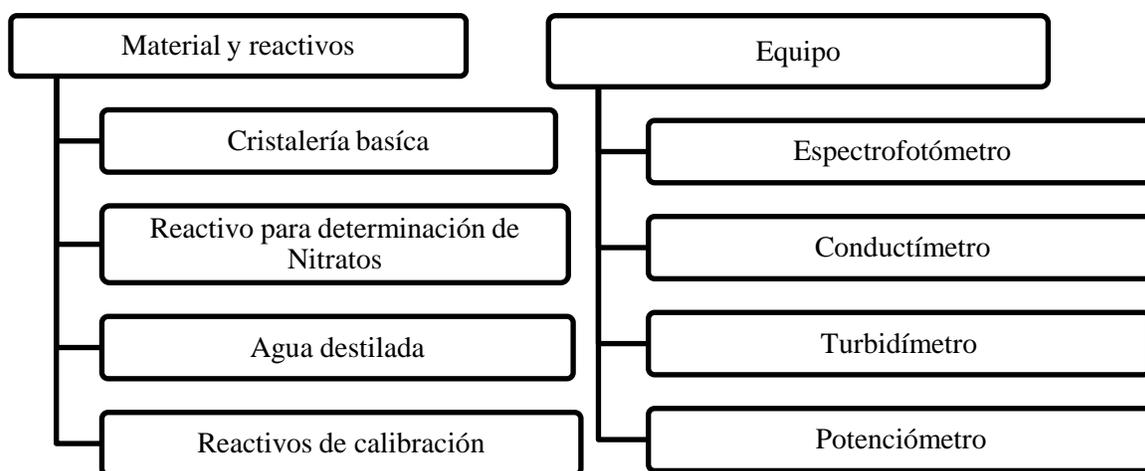


Figura 19 Material, reactivos y equipo para la elaboración de análisis fisicoquímico.

pH	Turbiedad	SDT	Nitratos (NO ₃)
<ul style="list-style-type: none"> • Calibrar el equipo • Introducir el electrodo a la muestra • Esperar la lectura del pH 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibrar el equipo • Agregar a agua a analizar en las celdas del equipo • Limpiar la celda perfectamente • Introducir la celda al equipo y registrar la lectura 	<ul style="list-style-type: none"> • Introducir el electrodo del equipo a la muestra, registrar la lectura 	<ul style="list-style-type: none"> • Calibrar el equipo con un blanco • Agregar muestra a una celda del equipo • Agregar un sobre de reactivo • Dejar pasar el tiempo de reacción • Introducir la celda al equipo, registrar lectura

Figura 20 Procedimiento para la determinación de parámetros fisicoquímicos.

5.4. EPANET

EPANET es un programa que realiza simulaciones del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de distribución a presión en un periodo de tiempo determinado; está diseñado para ser una herramienta en el conocimiento relacionado con el movimiento y el destino de los constituyentes del agua en una red de distribución. Es utilizado en el diseño de programas de muestreo, calibración de modelos hidráulicos, análisis de cloro residual y valoraciones de riesgo.

Para los fines de este trabajo de tesis EPANET se utilizó para simular la distribución de cloro residual libre en la red de distribución del Campus Central de la UNAM así como para estimar la dosis de desinfectante a aplicar.

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados promedios obtenidos de 270 pruebas de cloro residual libre realizadas durante cinco semanas de muestreo, de igual forma se presentan los resultados obtenidos a las pruebas microbiológicas y a la simulación realizada. A su vez en este capítulo se muestra las condiciones de operación para los sistemas de desinfección.

6. Programa de monitoreo para la red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria

Para cumplir con los objetivos establecidos en el presente tesis fue necesario diseñar y poner en marcha un programa de monitoreo para evaluar la calidad del agua potable de la red de distribución que abastece a la población Universitaria, lo anterior debido a que al momento de iniciar este trabajo, no se contaba con un programa formal para dicho fin.

El programa de monitoreo establece puntos de muestreo representativos de la red de distribución, el número de muestras, la frecuencia de muestreo y los parámetros indicadores de calidad a evaluar. El programa y las bases de diseño se describen con detalle en el capítulo de metodología.

Se seleccionaron un total de 18 puntos de muestreo los cuales representan el universo de las 136 dependencias ubicadas en el Campus, abarcan los cinco sectores hidráulicos en los que está dividida la red de distribución de agua potable mismos que son abastecidos a partir de tres tanques de almacenamientos y tres pozos profundos de extracción. Un criterio utilizado para seleccionar los puntos de muestreo fue la distancia de recorrido del agua en la red de distribución, por lo que se tomó en cuenta puntos cercanos a los tanques de almacenamiento, puntos intermedios y los extremos de la red, para ello fue necesario conseguir información y características de la red y su modo de operar.

Debido a que el interés principal de la presente tesis está centrado en el sistema de desinfección, el programa de monitoreo consideró la cuantificación de los niveles de cloro residual libre y el análisis de Coliformes fecales como indicativo de la calidad microbiológica del agua. El monitoreo del agua se realizó durante los meses Marzo y Abril, los días martes y jueves desde las 10:30 con una duración aproximada de 3 horas.

En el mapa de la figura 21 muestra las dependencias seleccionadas como puntos de muestreo, los tanques de almacenamiento y pozos de extracción de agua, en la tabla 13 se dan las coordenadas de ubicación de cada punto dentro del mapa antes mencionado.

Es importante señalar que este programa es la base para la implementación de un programa de monitoreo permanente para evaluar y dar seguimiento a la calidad del agua en el Campus Universitario.

Tabla 13 Coordenadas de los sitios de monitoreo, tanques de almacenamiento y pozos de extracción.

	Institución	(x, y)
Pozos de extracción		
	Química	L, 5
	Multifamiliar	G, 8
	Vivero alto	D, 14
Tanques de almacenamiento		
	Alto	E, 5
	Bajo	G, 6
	Vivero alto	B, 13
Sitios de monitoreo en la red de distribución		
	Base 1	J, 2
	F. Medicina	M, 4
1	IIMAS	M, 6
	DGAE	P, 8
	Ciencias de la Atmósfera	O, 8
	Base PUMABUS	O, 9
2	DGSM	I, 5
	Tienda UNAM	O, 11
3	I. Materiales	M, 8
	Frontón Cerrado	J, 8
4	T. Conservación	G, 2
	FCPyS	M, 12
	CUT	J, 14
5	Teatro y Danza	I, 15
	Universum	K, 16
	Patrimonio	K, 16
Sitios de monitoreo en cercanos a los tanques de almacenamiento		
Tanque Alto	Estación de bomberos	H, 6
Tanque Bajo		
Tanque vivero alto	Pozo vivero alto	D, 14

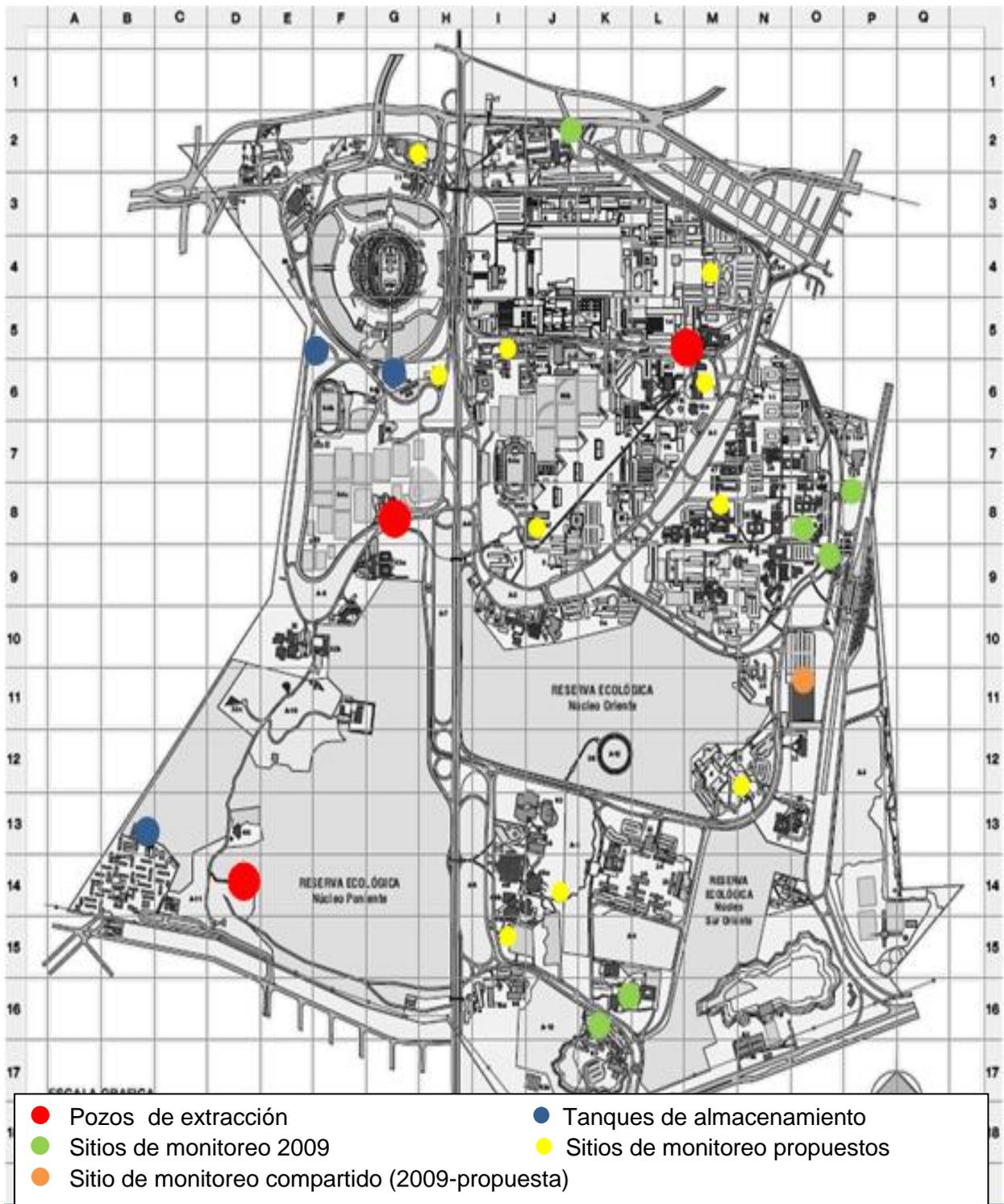


Figura 21 Distribución de los sitios de monitoreo, tanques de almacenamiento y pozos de extracción.

6.1 Cloro residual libre en agua de la red de distribución

La figura 22 muestra los resultados de los cinco muestreos realizados y un panorama general de la concentración de cloro residual en sitios representativos de la red de distribución. En esta figura se observa que hay una dispersión significativa en los niveles de concentración (1.11 ± 0.4 mg/L) para los distintos días y sitios de muestreo, aun para un solo sitio de monitoreo. Esto se puede atribuir a las condiciones de operación de la red de distribución y de las de cloración en los pozos de extracción, aspectos que serán discutidos con detalle más adelante. Se puede notar también que en la mayor parte los análisis realizados (83%), el nivel de cloro se encontró dentro de lo recomendado por norma.

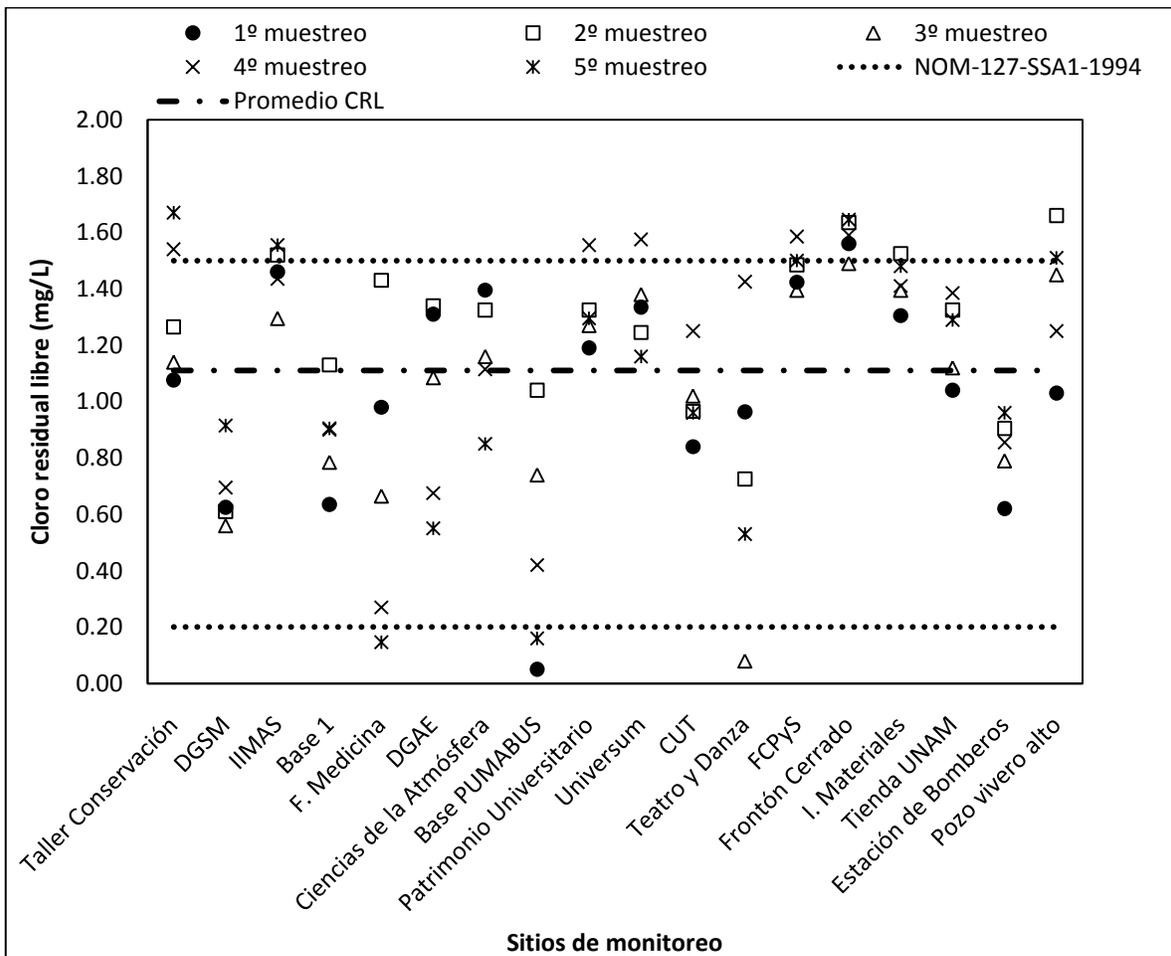


Figura 22 Comportamiento del cloro residual en la red de distribución.

Dada las características particulares y la complejidad que se tiene en la operación de la red de distribución del Campus Universitario, los resultados del monitoreo de cloro residual serán analizados por sector hidráulico y de acuerdo a la fuente inmediata de abastecimiento, esto es, los tanques de almacenamiento (alto, bajo o vivero alto) y los pozos de extracción respectivos (Pozo del Multifamiliar, Pozo de Química, Pozo Vivero Alto).

Los resultados de cloro residual que se obtuvieron en los diferentes muestreos realizados, se analizan en función de la distancia que recorre el agua para llegar a cada punto de consumo y tomando como base los límites permisibles establecidos en la norma (0.2 a 1.5mg/L; NOM-127-SSA1-1994).

6.1.1 Cloro residual en los sectores hidráulicos I y II

La figura 23 muestra los niveles de cloro encontrados en los sectores hidráulicos I y II, los cuales reciben agua del Tanque Bajo y en ocasiones (dependiendo las condiciones de operación) recibe agua proveniente del Pozo Multifamiliar, el tanque bajo a su vez es abastecido por los pozos de Facultad de Química y Pozo del Multifamiliar.

En la gráfica 23 se resumen los resultados de los cinco muestreos realizados y se puede observar que los niveles de cloro no muestran un comportamiento claro y lógico con respecto a la distancia de recorrido del agua. Se esperaba que la concentración fuese menor en aquellos casos en donde el agua recorre mayores distancias en la red de distribución para llegar al punto de consumo. Por otra parte se puede notar que en todos los sitios se presentaron diferencias en la concentración de cloro detectada en cada uno de los monitoreos realizados, en algunos casos esta diferencia fue más significativa (Base PUMABUS, DGAE, F. Medicina). Sin embargo se puede observar que para un mismo día de monitoreo los niveles de cloro seguían un comportamiento similar, esto es, que todos los valores de cloro obtenidos durante ese día mostraban el mismo patrón, eran concentraciones bajas o eran altas.

El comportamiento de los niveles de cloro en los sectores hidráulicos I y II puede ser atribuido a que estos están siendo abastecidos por líneas de agua cuya concentración de cloro es diferente, lo que ocasiona variaciones en los niveles de desinfectante en el agua de la red. Cabe recordar que el Tanque Bajo se abastece por dos líneas principales de agua, que provienen de los Pozos de extracción de Facultad de Química y Multifamiliar, respectivamente. De ahí la importancia de mantener en forma constante los niveles de cloración a pie de pozo, lo que puede contribuir a mantener una concentración homogénea de cloro en los tanques de almacenamiento y por lo tanto, un comportamiento más regular en el agua de la red de distribución.

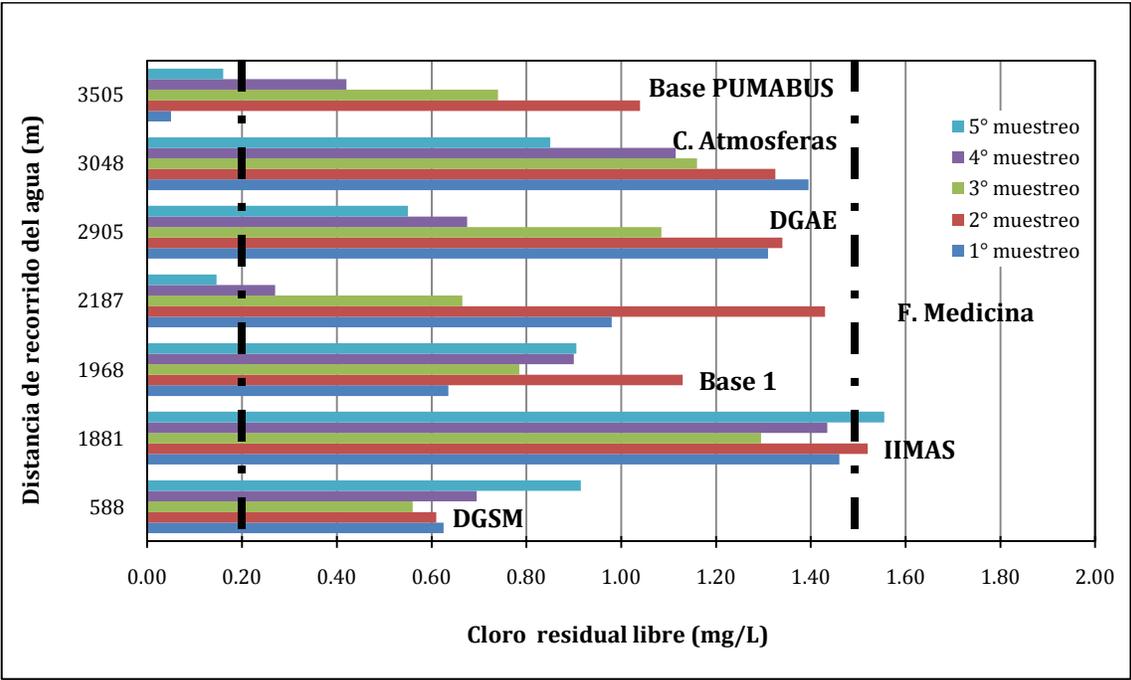


Figura 23 Cloro residual libre en puntos de muestreo ubicados en los sectores hidráulicos I y II que son abastecidos con agua del Tanque Bajo.

Con respecto a los niveles de cloro detectados en el agua de la red se puede observar que en general en todos los puntos de muestreo, estos se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma (0.2 a 1.5mg/L; NOM-127-SSA1-1994, líneas rojas).

En el punto de muestro identificado como base PUMABUS (0.056, 0.16 mg/L) se detectaron niveles en el límite inferior o por debajo de lo permitido por la norma (0.2 mg/L). En este sitio en particular, dichos niveles coinciden por un lado, en que es el extremo de la red, donde es el mayor recorrido realizado por el agua (3.505 km), por otra parte, es un sitio (caseta) donde el consumo de agua es limitado y por lo tanto la permanencia del agua en la red puede ser un factor condicionante. Sin embargo, en el 2° y 3er muestreo se cuantificaron niveles aceptables de cloro (1 y 0.74 mg/L, respectivamente); este hecho coincide en que para estos dos días de muestreo, se encontraban operando las llaves de agua de riego contiguas al punto de muestreo, las cuales son alimentadas por la misma línea de agua, y por lo tanto esta se encontraban adecuadamente purgadas.

Otro resultado a destacar es del IIMAS, en donde en todos los muestreos se detectaron altas concentraciones de cloro (>1.25 mg/L), inclusive se llegó a superar el límite máximo permisible registrándose un valor residual de 1.6 mg/L. Estos resultados pueden ser explicables por la cercanía que guarda este punto con el tanque de almacenamiento y a partir del cual recibe agua, que es de aproximadamente (1.881 km). Este punto de muestreo en particular, se comporta de manera diferente al grueso de los demás sitios, probablemente debido a que está siendo abastecido por una línea que provenga del pozo multifamiliar; de igual forma para los casos de la DGAE y C. Atmósfera.

6.1.2 Cloro residual en el sector hidráulico III

El sector hidráulico III no recibe agua de algún tanque de almacenamiento, este sector hidráulico en particular es abastecido por el Pozo Multifamiliar. En la figura 24 se muestra el comportamiento del cloro residual libre en donde se puede notar una correspondencia entre el decaimiento de los niveles de concentración de cloro y el recorrido del agua en cada uno de los puntos de muestreo. Por otra parte se puede notar que en este sector hidráulico los valores de concentración son más homogéneos entre sí.

Un aspecto a destacar es que el agua de este sector hidráulico contiene elevadas concentraciones de cloro cercanas al límite superior establecido por la norma (1.5 mg/L; la NOM-127-SSA1-1994) y que incluso, en el caso del punto de muestreo ubicado en el Frontón Cerrado, llegó a superarlo en cuatro de los cinco muestreos realizados. Estos niveles de concentración están directamente relacionados con la distancia que existe entre el pozo multifamiliar a partir del cual se suministra el agua y el punto de monitoreo en cuestión. La relevancia de la alta concentración de cloro detectada en el este último sitio, 1.58 mg/L en promedio, es que existe la posibilidad de que aquellas dependencias que se encuentren ubicadas antes de este punto, estarían recibiendo una concentración de cloro superior o igual a la antes mencionada.

Cabe recordar que un inconveniente que se tiene cuando existen altos niveles de cloro residual libre en agua, es que aumenta la probabilidad de que se formen subproductos de desinfección, impactando de manera negativa sobre la calidad del agua y la salud de los consumidores, aunados a lo anterior, el agua presenta olor y sabor desagradable.

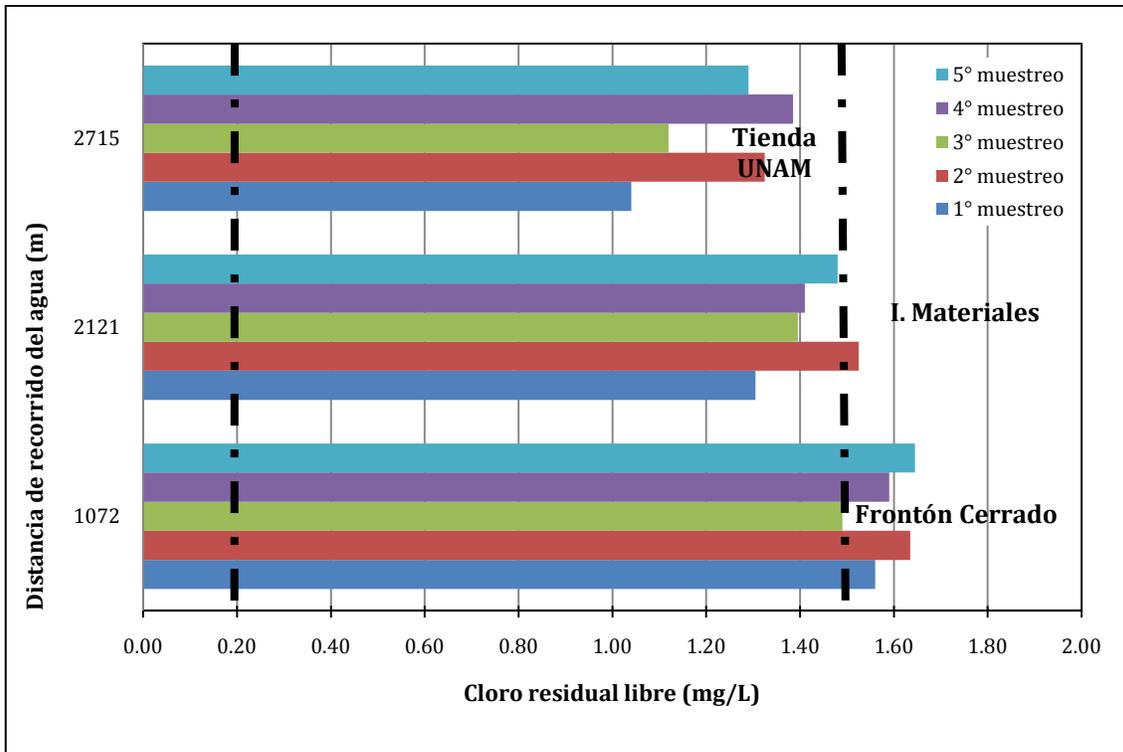


Figura 24 Cloro residual libre en puntos de muestreo ubicados en el sector hidráulico III que es abastecidos por el Pozo Multifamiliar.

6.1.3 Cloro residual denle el sector hidráulico IV

La figura 25 muestra el comportamiento del cloro del sector hidráulico IV cuya agua proviene del Tanque Alto. Este último tanque de almacenamiento recibe agua de los Tanques Bajo y Vivero Alto, por lo este sitio de monitoreo estaría recibiendo agua de los tres pozos de extracción.

Para el monitoreo de cloro residual se seleccionó el Taller de Conservación como único sitio de muestreo representativo de dicho sector hidráulico, debido a que éste es muy pequeño comparado con otros sectores y se considero representativo debido a que se encuentra ubicado en el extremo de la red de distribución, por lo que el agua que llega a esta dependencia estaría haciendo el mayor recorrido.

En la gráfica de la figura 25, se puede observar que en el agua de este sector hidráulico se encuentran niveles elevados de cloro residual libre >1mg/L,

registrándose incluso valores superiores a la norma en los dos últimos muestreos realizados (1.54 y 1.67 mg/L, respectivamente). Estas altas concentraciones de cloro detectadas en el agua pueden ser atribuibles a la cercanía del sitio de muestreo con respecto al tanque a partir del cual se abastece, teniendo un recorrido el agua en la red de aproximadamente 1.162 km.

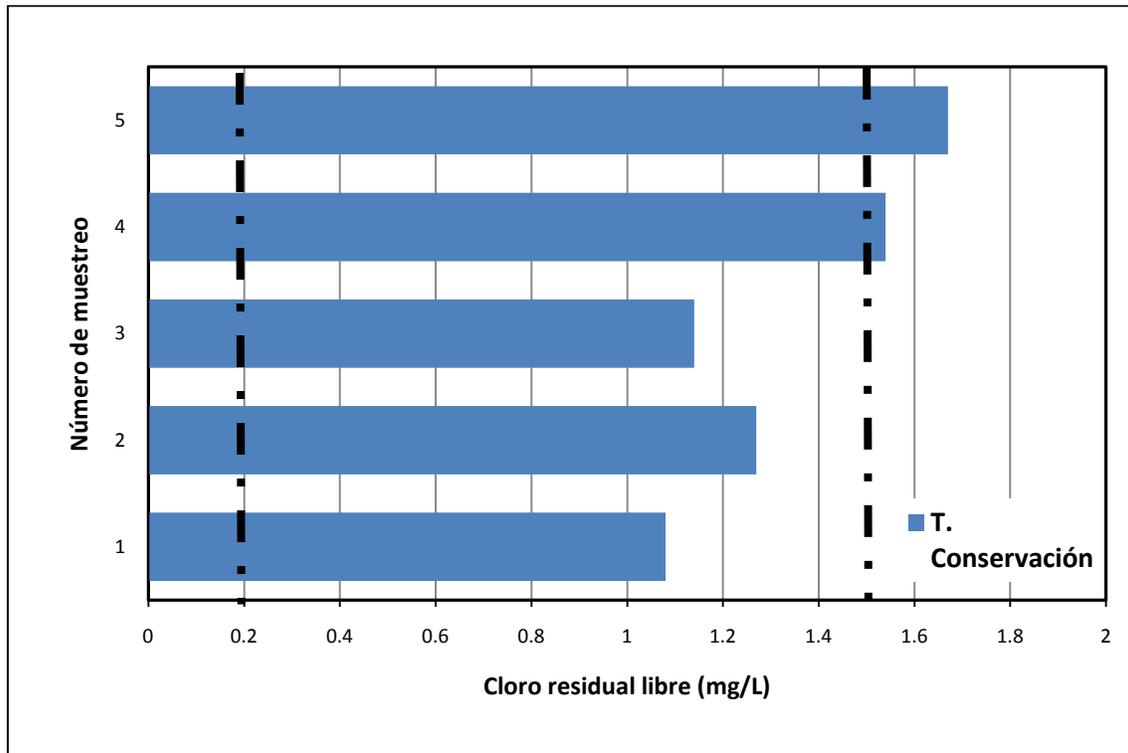


Figura 25 Cloro residual libre en punto de muestreo (Taller de Conservación, 1,162m) del Sector Hidráulico V abastecido con agua del Tanque Alto.

Para este sector hidráulico en particular, el hecho de que este sitio de monitoreo que se encuentra ubicado en el extremo de la red, reciba una concentración de cloro residual libre de 1.34 mg/L promedio, indican por un lado que las dependencias más cercanas a la fuente de suministro de agua contarán también con presencia de cloro residual. Sin embargo como ya se mencionó anteriormente, los altos niveles de cloro libre residual pueden representar un problema por la formación de subproductos y afectar las características organolépticas del agua.

6.1.4 Cloro residual en el sector hidráulico V

El sector hidráulico V distribuye agua a las dependencias que se encuentran ubicadas en la Zona Cultural, este sector recibe agua a partir del Tanque Vivero Alto el cual se abastece del Pozo de extracción del mismo nombre.

Los resultados de monitoreo se presentan en la gráfica la figura 26 donde puede notar un claro decaimiento en los residuales de cloro en función de la distancia que recorre el agua a excepción de uno de los puntos de muestreo, el de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (FCPyS). Este último se encuentra ubicado en el extremo de la red de este sector hidráulico y es donde el agua recorre mayor distancia (3.459 km) para llegar al punto de consumo. A diferencia de lo ocurrido con los demás casos, en dicho punto de muestreo se detectaron las concentraciones más altas de cloro (1.59 mg/L) superando incluso el nivel máximo recomendado por norma. En algunos otros puntos de este sector, particularmente los más cercanos a los tanques de almacenamiento, también llegaron a superar los niveles de norma (Universum y Patrimonio Universitario).

La explicación a dicho comportamiento es que la FCPyS se encuentra ubicada en los límites de los sectores hidráulicos III y V, esta parte de la red además de recibir agua del Tanque Vivero Alto, aparentemente también recibe agua directamente del Pozo Multifamiliar.

Al igual que en el caso del Sector Hidráulico III (ver la figura 24), se observa la importancia de la concentración inicial (2mg/L para los tres sistemas de desinfección utilizados en CU) para así mantener los niveles de cloro residual dentro de norma.

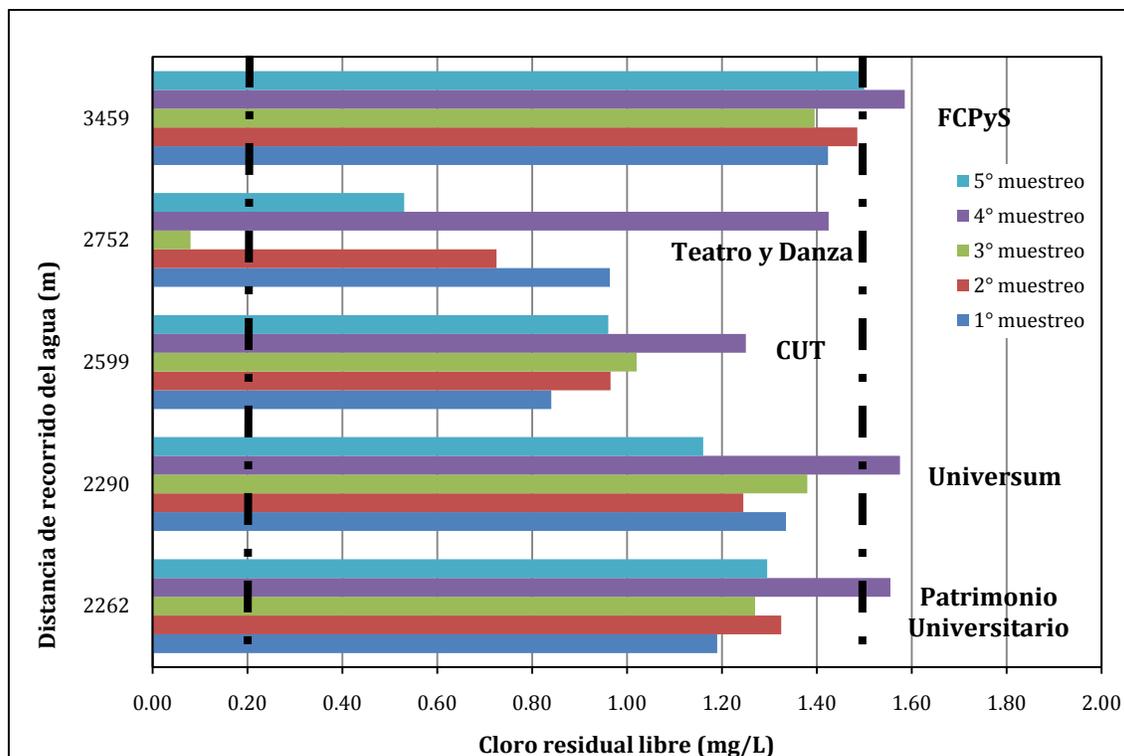


Figura 26 Cloro residual libre en puntos de muestreo del Sector Hidráulico V abastecido principalmente con agua del Tanque Vivero alto.

6.1.5 Cloro residual en sitios cercanos a tanques de almacenamiento y pozos de extracción

Con la finalidad de conocer la concentración de cloro con la que ingresa el agua a la red de distribución se hizo un muestreo agua y el análisis de cloro residual libre en dos puntos específicos: 1) después de cloración y antes de los tanques de almacenamiento del Pozo de extracción Vivero Alto; y 2) en la estación de bomberos, que es uno de los puntos más cercanos al tanque de almacenamiento bajo.

Como era de esperarse las concentraciones de cloro residual más altas se cuantificaron el sitio cercano al Pozo del vivero alto, después de la cloración (Figura 27). En este sitio se detectaron concentraciones cercanas al límite máximo superior y ligeramente por encima de este (1.66 mg/L).

En el caso de la Estación de Bomberos, el punto más cercano al tanque de almacenamiento bajo se encontró niveles medios de concentración de cloro, entre 0.62 y 0.96 mg/L. Estos niveles de cloro concuerdan con lo obtenido en otros puntos de la red, que tienen relación por su cercanía y que son abastecidos con dicho tanque de almacenamiento, es el caso de la Dirección General de Servicios Médico (DGSM), donde se detectaron concentraciones entre 0.56 y 0.92 mg/L (ver Figura 23). En aquellos puntos de muestreo donde no existe una concordancia entre los niveles de cloro residual y el tanque de alimentación que los abastece, es probable que se pueda deber a una mezcla de líneas provenientes del tanque bajo con líneas que se abastecen del Pozo Multifamiliar y el Pozo de Química.

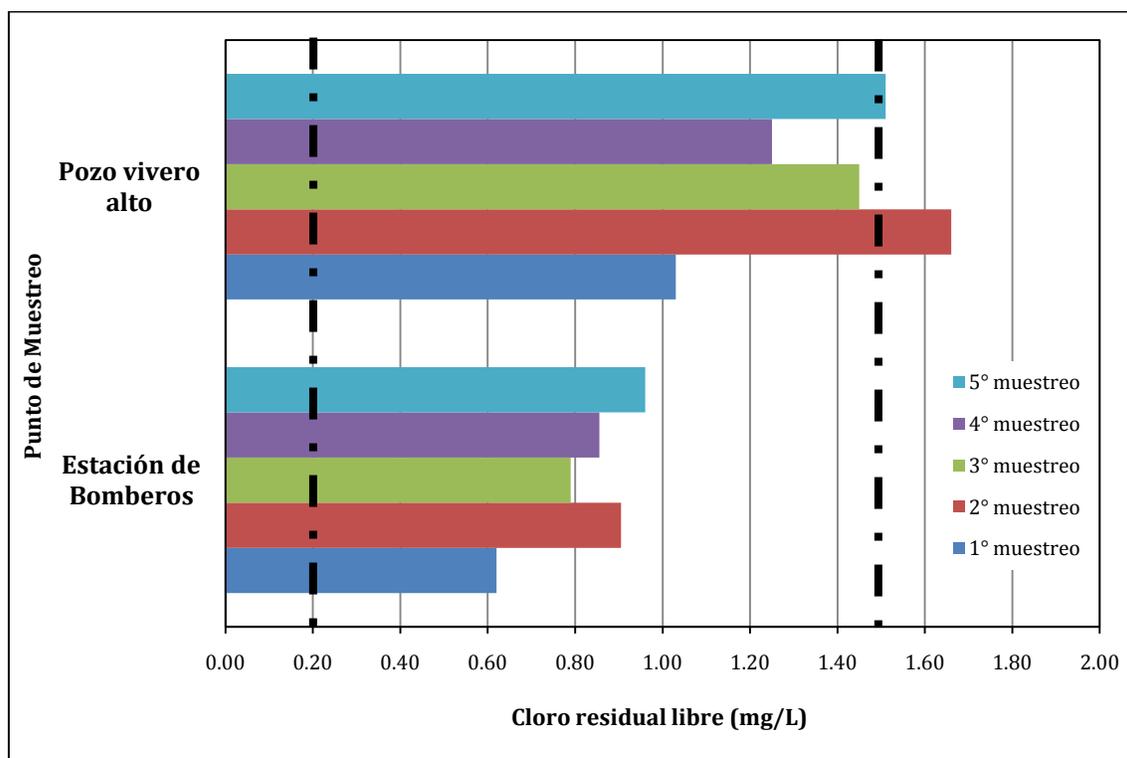


Figura 27 Cloro residual libre en sitio cercano al pozo Vivero Alto y Estación de Bomberos.

Como lo indican los resultados de las figuras (23, 24, 25, 26 y 27) los niveles de cloro residual están presentes para las diversas distancias de recorrido de agua, sin embargo estos no tienen un comportamiento homogéneo; es preciso repetir que se debe tener cuidado en los sitios de monitoreo donde se encontraron niveles de cloro residual por encima del valor de la norma (1.5mg/L), debido a que en estos existe una mayor posibilidad de hallar subproductos de desinfección y dañar las propiedades organolépticas del agua.

6.2 Calidad microbiológica del agua de la red de distribución

La cloración a pie de pozo en el sistema de abastecimiento de Ciudad Universitaria tiene como objetivos principales: 1) la desinfección de agua, y 2) mantener los niveles de cloro residual libre para preservar la calidad microbiológica en el agua de la red de distribución.

Tomando en cuenta la calidad de agua de la fuente subterránea de abastecimiento de Ciudad Universitaria, la desinfección resulta ser una etapa preventiva para garantizar la calidad microbiológica del agua en términos generales.

En la presente tesis, a la par de que se realizó el monitoreo de cloro residual en el agua de la red de distribución, se tomaron muestras en cada uno de los puntos de monitoreo con el fin de detectar la presencia de Coliformes fecales y conocer con ello la calidad microbiológica del agua que con la que se abastece a la población Universitaria.

Como ya se menciona la desinfección tiene por objetivo la eliminación de microorganismos patógenos del agua, es por ello que la cuantificación de las coliformes fecales se vuelve un parámetro importante en la evaluación del proceso de desinfección. Por otra parte cabe recordar que el cloro residual libre es la cantidad de cloro que se encuentra presente después de haber cubierto la demanda inicial del agua (reacciones con sustancias presentes en el agua) y la

desinfección, por lo tanto el hecho de que exista una concentración final de cloro significa una eliminación de estos microorganismos (coliformes fecales).

Adicionalmente, con el análisis microbiológico se busca establecer una relación entre los niveles de cloro residual libre y la presencia y/o ausencia de Coliformes fecales, con la finalidad de poder hacer ajustes en los niveles de cloración del agua.

La tabla 14 presenta en forma resumida los resultados obtenidos de los análisis microbiológicos en los sitios monitoreados de la red de distribución y se comparan con el nivel de concentración promedio de cloro residual detectado en el agua de la red.

Un primer resultado a destacar es la ausencia de Coliformes fecales en todas las muestras de agua que se analizaron, lo que indica que esta cumple con los requisitos establecidos para su consumo, de acuerdo con NOM-127-SSA1-1994 (Ausencia UFC/100 mL). Estos resultados corroboran por un lado la calidad del agua de la fuente de abastecimiento y por otra parte, la eficacia del proceso de desinfección y los niveles de cloro libre residual para mantener y preservar la inocuidad del agua en toda la red de distribución.

Con respecto a la relación que existe entre los niveles de cloro residual y la ausencia de Coliformes fecales, se puede observar que aún y en aquellos sitios donde se detectaron concentraciones bajas de cloro (0.1 – 0.2 mg/L), se logra mantener la buena calidad del agua. Esto último permite plantear que no se requiere mantener altos niveles de cloro residual libre en el agua de la red, como ocurre en la mayor parte del agua de la red de distribución, para mantener la calidad del agua. Por lo que una primera recomendación de este trabajo sería, que deben reducirse los niveles de cloración, para reducir al máximo la posible formación de subproductos de la cloración.

Tabla 14 Resultados de análisis microbiológicos y su relación con los residuales de cloro residual

Fuente de abastecimiento	Dependencia	Nivel de CRL (mg/L)		Coliformes fecales (UFC/100mL)
		Min	Max	
Tanque Alto	Taller Conservación	1.08	1.67	0.00E+00
Tanque Bajo	DGSM	0.56	0.92	0.00E+00
	IIMAS	1.29	1.56	0.00E+00
	Base 1	0.64	1.13	0.00E+00
	F. Medicina	0.15	1.43	0.00E+00
	DGAE	0.55	1.34	0.00E+00
	Ciencias de la Atmósfera	0.85	1.40	0.00E+00
	Base PUMABUS	0.10	1.04	0.00E+00
Tanque Vivero Alto	Patrimonio Universitario	1.19	1.56	0.00E+00
	Universum	1.16	1.58	0.00E+00
	CUT	0.84	1.25	0.00E+00
	Teatro y Danza	0.08	1.43	0.00E+00
	FCPyS	1.40	1.59	0.00E+00
Pozo Multifamiliar	Frontón Cerrado	1.49	1.65	0.00E+00
	I. Materiales	1.31	1.53	0.00E+00
	Tienda UNAM	1.04	1.39	0.00E+00
Tanques de almacenamiento	Estación de bomberos	0.62	0.96	0.00E+00
	Pozo vivero alto	1.03	1.66	0.00E+00

6.3 Seguimiento de la calidad del agua potable en Ciudad Universitaria

La cuantificación de parámetros indicadores adicionales a los ya discutidos, tuvo como principal objetivo el complementar los datos de calidad de agua y compararlos con los resultados obtenidos en estudios previos. Para ello, en forma paralela al monitoreo de cloro residual, se tomaron muestras de agua de cada punto de muestreo y se hizo la determinación de pH, turbiedad, SDT y Nitratos. En la tabla 15 se presentan los resultados promedio de cuatro de los cinco muestreos realizados en cada punto de la red de distribución.

Tabla 15 Resultados promedios de los análisis fisicoquímicos del agua potable en la red de distribución.

Fuente de suministro	Dependencia	Parámetro			
		pH	Turbiedad	SDT	Nitratos
		Unidades de pH	(UNT)	mg/L	mg/L
Tanque Alto	Taller Conservación	8.06	1.09	215.00	3.03
Tanque Bajo	DGSM	7.56	0.64	246.67	2.39
	IIMAS	7.59	1.08	223.33	3.53
	Base 1	7.57	1.02	240.00	2.81
	F. Medicina	7.45	0.86	233.33	2.55
	DGAE	7.68	0.89	226.67	2.95
	Ciencias de la Atmósfera	7.59	0.69	230.00	3.11
	Base PUMABUS	7.72	1.28	230.00	2.71
Promedio		7.59±0.09	0.92±0.22	232.8±8.0	2.86±0.38
Tanque Vivero Alto	Patrimonio Universitario	7.58	0.78	215.00	3.74
	Universum	7.51	0.91	210.00	3.65
	CUT	7.65	0.73	220.00	3.53
	Teatro y Danza	7.47	1.10	220.00	3.30
	FCPyS	7.64	0.96	220.00	3.86
Promedio		7.57±0.08	0.90±0.15	217.00±4.5	3.62±0.21
Pozo multifamiliar	Frontón Cerrado	7.47	0.65	226.67	3.66
	I. Materiales	7.54	0.74	230.00	3.36
	Tienda UNAM	7.54	1.14	230.00	2.99
Promedio		7.52±0.04	0.84±0.26	228.89±1.92	3.34±0.34

Se puede observar en los valores de la tabla 15 que parámetros como el pH y los SDT guardan similitud con respecto a la fuente de suministro de agua; la turbiedad y los nitratos, presentaron mayor grado de variación.

En todos los parámetros de calidad, tanto los valores individuales como los valores promedio que resultaron del análisis, cumplen con los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, para aguas destinados al uso y consumo humano.

En el caso de los nitratos se encontraron valores promedio entre 2.8 y 3.6 mg/L, las mayores concentraciones se detectaron en puntos de la red abastecidos por el Tanque Alto y Pozo Multifamiliar; los niveles de concentración de este parámetro se encuentran dentro de lo reportado para fuentes de agua de origen subterráneo, como es el caso de este estudio. La concentración natural en aguas subterráneas en condiciones aerobias, es del orden de unos pocos mg/L y depende en gran medida del tipo de suelo y de la situación geológica (WHO, 1998). En los EE.UU por ejemplo., los niveles no excedan de 4-9 mg/L (En WHO, 1998, reportado por EPA de los EE.UU., 1987).

En la tabla 16 se muestra una comparación de los datos obtenidos en monitoreos anteriores con los obtenidos durante la elaboración de este trabajo. Se observa que a lo largo de tres años los valores de los parámetros de calidad se mantienen dentro de la media global; los que muestran mayores variaciones son la turbiedad, la concentración de nitratos y el cloro residual libre.

El pH es un parámetro que se ha mantenido constante en sus valores a lo largo del tiempo en los diferentes puntos de muestreo; de hecho es el que menos cambios ha registrado (Promedio anual: 2008, pH 7.21; 2010, pH 7.24; 2011, pH 7.54).

La turbiedad y los Nitratos son parámetros que se han caracterizado por presentar variaciones en función del sitio de muestreo y en todos los años, a pesar de ello, en ninguno de estos casos, se han registrado incrementos significativos con respecto al tiempo, que sugieran un detrimento de la calidad del agua.

Con respecto a los niveles de cloro residual libre detectados en diferentes puntos de la red abastecimiento, se observa que han ocurrido incrementos significativos en los últimos dos años (Promedio anual: 2008, 0.48 mg/L; 2010, 0.92 mg/L; 2011, 1.11 mg/L). Es probable que estos incrementos se atribuyan a modificaciones en la operación de la red de distribución.

Tabla 16 Evolución de la calidad del agua potable en CU (PUMAGUA, 2008, 2009).

Parámetro	2008					2010		2011		
	Pozo Química	Pozo Multi-familiar	Pozo Vivero Alto	Tanque bajo	Llave Ed. 5 II	Llave Ed. 5 II	Toma principal Ed. 5 II	Tanque alto y bajo	Tanque vivero alto	Red de distribución
<i>pH</i> (unidades de pH)	7.20	7.20	7.17	7.28	7.22	7.27	7.21	7.58	7.43	7.60
<i>Turbiedad</i> (UNT)	1.71	0.27	0.71	0.67	0.14	0.74	1.11	0.66	0.74	0.91
<i>N-NO₃</i> mg/L	1.52	4.34	6.60	2.60	5.23	2.68	2.76	1.83	3.74	3.20
<i>Cloro residual libre</i> (mg/L)	0.03	0.01	0.01	0.22	0.73	0.91	0.92	0.83	1.38	1.11
<i>Sólidos Disueltos Totales</i> (SDT) mg/L	196.72	219.29	210.00	173.38	218.67	214.44	214.65	240.00	225.00	226.04

El contenido de sólidos disueltos totales (SDT), también ha registrado un ligero incremento a lo largo de los tres años de monitoreo (Promedio anual: 2008, 203.6 mg/L; 2010, 214.5 mg/L; 2011, 230.3 mg/L). Es probable que ello se encuentre asociado al aumento de los residuales de cloro en el agua. Para el caso de las Coliformes fecales, los análisis microbiológicos realizados durante los años pasados de monitoreo (2008 y 2010) indican que la calidad del agua se mantiene sin cambios, presentando en ambos casos una ausencia de coliformes fecales, esto es consistente con los resultados encontrados durante este monitoreo (2011).

En general la evolución de la calidad del agua en los últimos tres años de monitoreo se ha mantenido sin cambios significativos, con la excepción de que se ha incrementado la concentración de cloro residual que en general se encuentra dentro de lo recomendado por norma.

6.4 Desinfección con hipoclorito de sodio (NaOCl)

En esta sección se abordan las condiciones de operación en las cuales en principio funcionarían los sistemas de desinfección a base de NaOCl, como desinfectante primario o secundario, como parte de las propuestas de mejora al sistema de desinfección presentadas en la sección de antecedentes. Se simulan dosis a aplicar y se evalúan los residuales de cloro en la red, se hacen estimaciones de las capacidades de los cloradores y los requerimientos de desinfectante para los tres pozos de abastecimiento.

6.4.1 Simulación de dosis y distribución de cloro residual en el agua de la red

Para estimar la dosis de NaOCl y evaluar la distribución de cloro residual libre en el agua de la red se utilizó el programa de simulación EPANET. El programa requiere de alimentar una dosis desinfectante y el orden global de la reacción del cloro, que para este caso de estudio, se supuso, que era de primer orden.

Primero se simularon las condiciones de dosificación actual reportadas por los operadores de los sistemas de cloración (2.0 mg/L, como cloro activo), los resultados de distribución de cloro residual en la red que arroja el programa de simulación se presentan en la Figura 28. De acuerdo con esta figura, los residuales de cloro se encontrarían entre 0.4-1.2 mg/L, con valores en los extremos de la red de 0.5 a 0.86 mg/L. Estos resultados se encuentran dentro del al promedio global obtenido de los monitoreos realizados en campo (1.11 ± 0.4 mg/L, ver Figura 22).

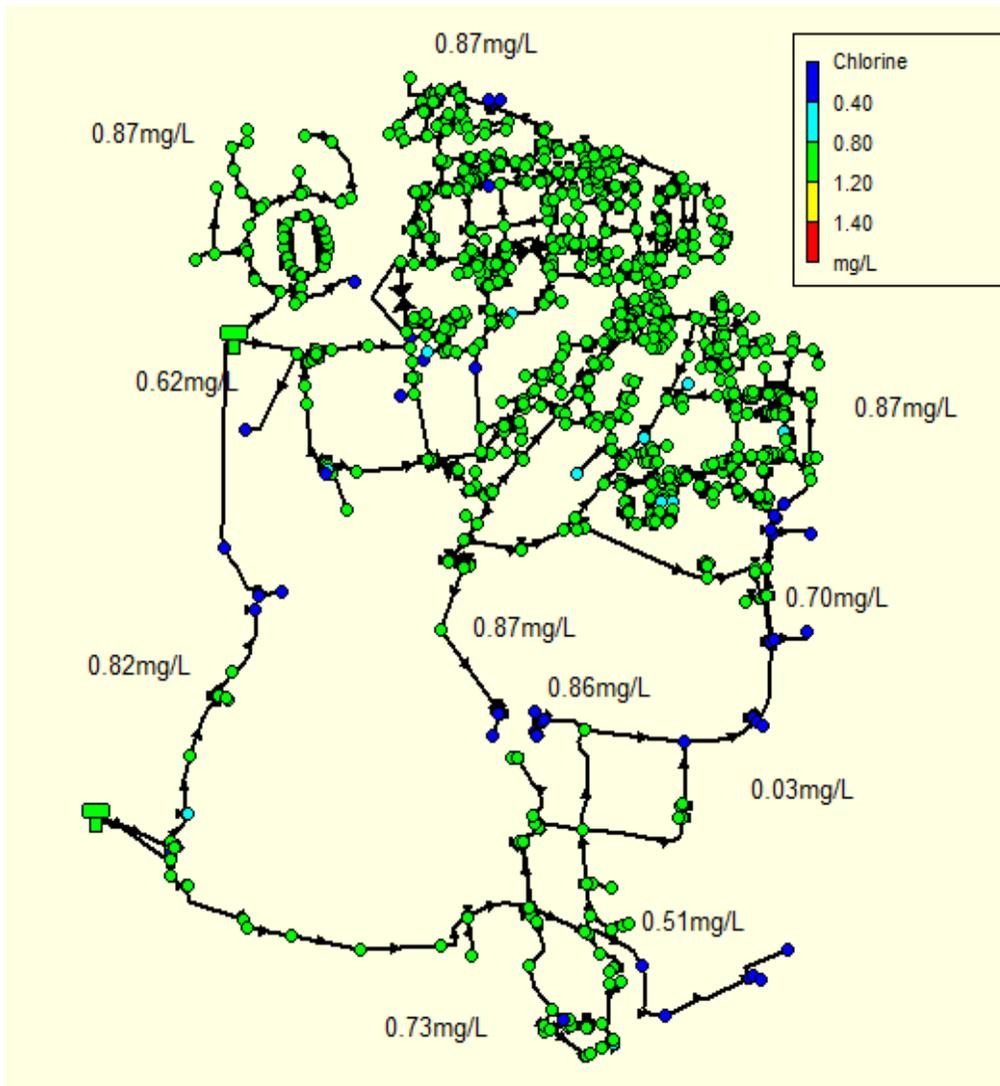


Figura 28 Distribución de cloro residual en la red obtenido por EPANET para una dosis de desinfectante de 2 mg/L.

En la tabla 17 se compara el valor promedio obtenido en campo de los cinco muestreos para los distintos puntos de muestreo de la red con los valores que arroja el programa de simulación. Los resultados muestran en la mayor parte de los casos existe una buena correlación (>60%) entre los resultados experimentales y los de simulación.

Tabla 17 Comparación de valores de cloro residual obtenidos por el monitoreo y el simulador.

Dependencia	Cloro residual libre (mg/L)		% Correlación
	Valor promedio de campo	Valor de simulación	
Taller Conservación	1.34 ± 0.26	0.87	65.01
DGSM	0.68 ± 0.14	0.87	72.25
Frontón Cerrado	1.58 ± 0.06	0.87	54.92
IIMAS	1.45 ± 0.10	0.87	59.88
Base 1	0.87 ± 0.18	0.90	98.97
I. Materiales	1.42 ± 0.08	0.87	61.14
F. Medicina	0.70 ± 0.53	0.87	75.39
Tienda UNAM	1.23 ± 0.15	0.00	0.00
DGAE	0.99 ± 0.36	0.87	87.70
Ciencias de la Atmósfera	1.17 ± 0.21	0.87	74.42
Base PUMABUS	0.48 ± 0.41	0.70	54.77
Patrimonio Universitario	1.33 ± 0.14	0.87	65.56
Universum	1.34 ± 0.16	0.87	64.97
CUT	1.01 ± 0.15	0.87	86.40
Teatro y Danza	0.74 ± 0.50	0.87	95.60
FCPyS	1.48 ± 0.07	0.03	2.030

Los resultados de cloro residual libre y los análisis microbiológicos del agua de la red obtenidos en campo (ver apartados, 6.1.1 a 6.1.5, figuras 23-27, tabla 14) así como la información que arroja el programa de simulación EPANET, indican que bajo las condiciones actuales de operación de los sistemas de cloración y el manejo de la red de distribución, no se considera necesario implementar puntos de rechloración en la red de distribución. Sin embargo, es importante considerar la reducción de los niveles de dosificación del cloro ya que en algunos casos se detectaron concentraciones que superan recomendado por la norma.

6.4.2 *Estimación de la dosis de NaOCl para desinfección primaria y secundaria.*

La estimación de la dosis de NaOCl se hizo para las dos alternativas de mejora al sistema de desinfección actual (ver Capítulo de antecedentes, sección 3): 1) Como desinfectante primario, en sustitución de cloro gas (Cl_2), garantizando los niveles de cloro residual libre en la red de distribución, y 2) Para la combinación O_3 -NaOCl, en el cual el hipoclorito de sodio sería utilizado como desinfectante secundario para mantener un efecto residual en la red de distribución.

Para estimar los requerimientos de dosis y niveles de cloro residual se hicieron simulaciones con el programa EPANET encontrando que para la primera alternativa, donde el NaOCl es utilizado como desinfectante primario, con dosis de 1.50 mg/L de desinfectante (como cloro activo), se obtendrían residuales de cloro en los extremos de la red de 0.65 mg/L (figura 29).

Para el segundo caso, los resultados de simulación indican que dosificando una concentración inicial de 0.75 mg/L (como cloro equivalente) de NaOCl como desinfectante secundario, es posible mantener en los extremos de la red residuales de cloro del orden de 0.33 mg/L lo cual se encuentra dentro de lo establecido por la NOM-127-SSA1-1994 (figura 30).

Es importante señalar que en cualquiera de los escenarios, es necesaria la implementación de las condiciones de operación (dosis propuestas) y después realizar una valoración experimental con determinaciones de cloro residual libre y coliformes fecales en campo para en caso de ser necesario modificar la dosis de desinfectante y obtener una que cumpla con los requerimientos especificados.

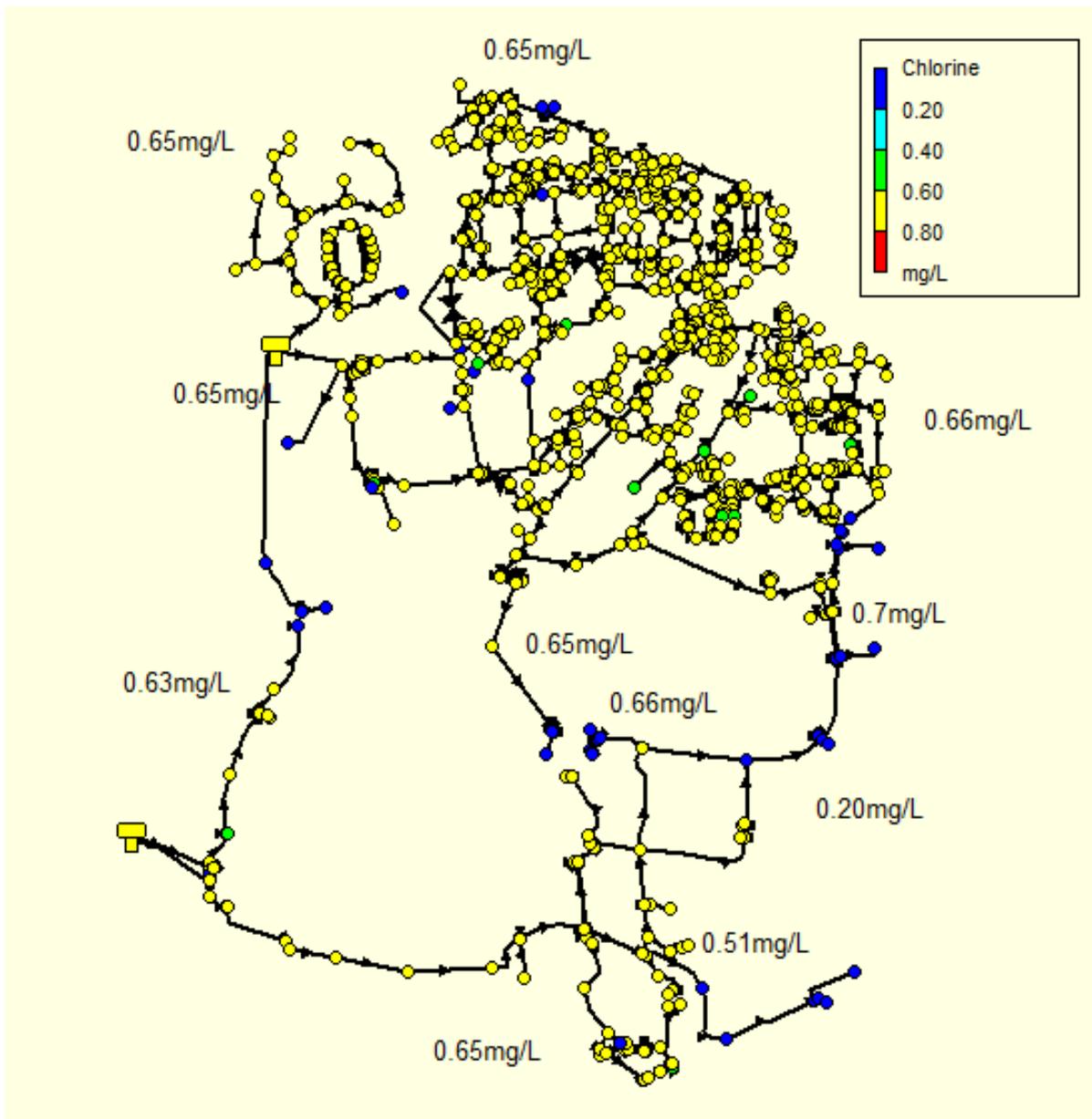


Figura 29 Distribución de cloro residual en la red obtenido por EPANET para una con una dosis de desinfectante de 1.50 mg/L.

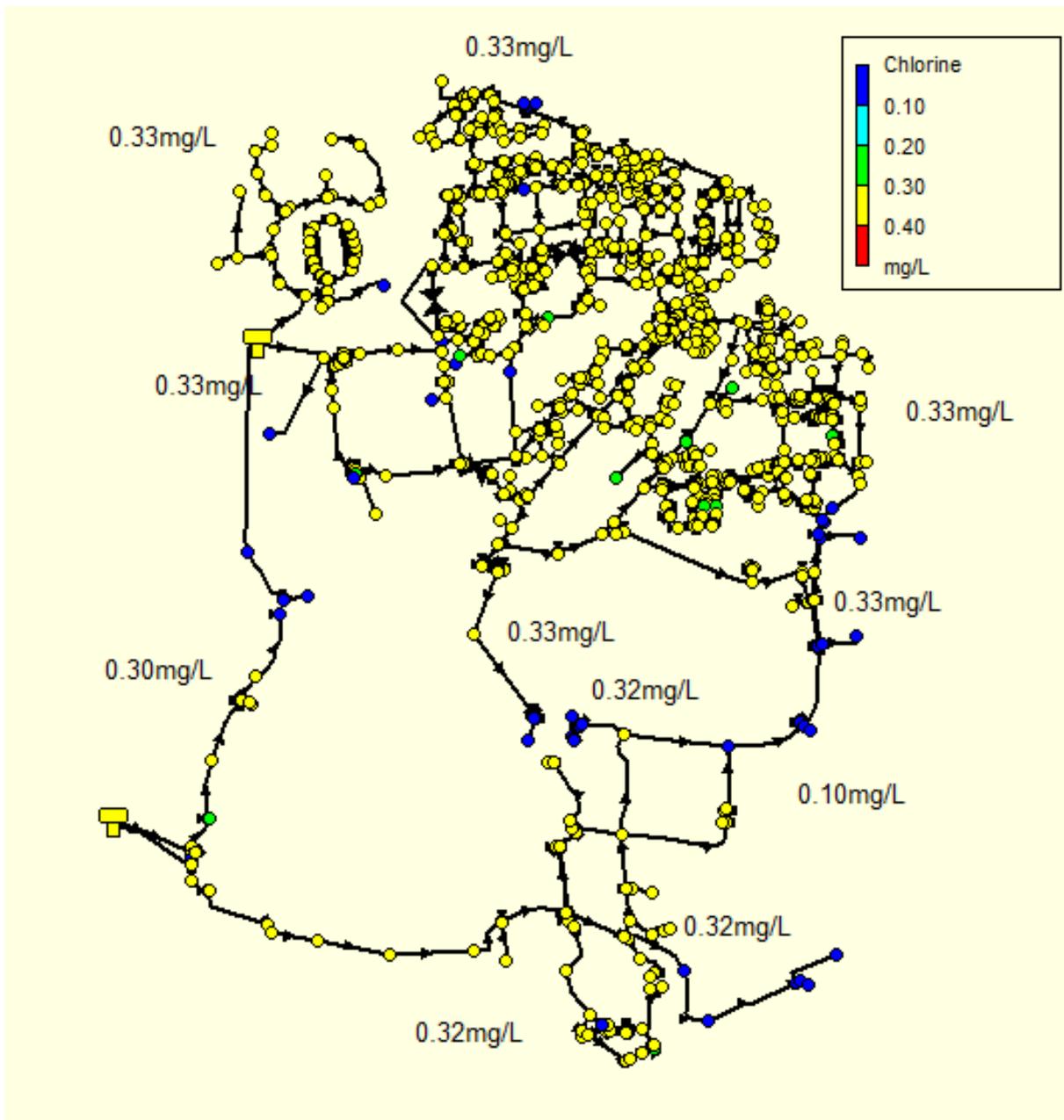


Figura 30 Distribución de cloro residual en la red obtenido por EPANET para una con una dosis de desinfectante de 0.75 mg/L.

6.5 Condiciones de operación de los sistemas de desinfección empleando NaOCl.

6.5.1 Capacidad de los sistemas de cloración y consumo de desinfectante

Para las dos alternativas de desinfección con hipoclorito de sodio, se hizo una estimación de la capacidad de los sistemas de cloración para cada pozo de extracción, tomando como base de cálculo un intervalo de dosificación entre 0.5 y 2 mg/L de NaOCl (como cloro activo), que cubre las dosis propuestas para la desinfección primaria (1.5 mg/L) y la secundaria (0.75 mg/L) respectivamente. La dosis más alta de 2 mg/L corresponde a las condiciones actuales de operación de los sistemas de cloración.

La capacidad de los cloradores depende del flujo de desinfectante a dosificar ($W_{\text{desinfectante}}$), el cual se obtiene multiplicando la dosis de desinfectante ($D_{\text{desinfectante}}$) y el flujo de operación de los pozos de extracción de agua ($Q_{\text{extracción de agua}}$), como se describe a continuación (ecuación 12):

$$D_{\text{desinfectante}} \left(\frac{mg}{L} \right) * Q_{\text{extraído}} \left(\frac{L}{s} \right) = W_{\text{desinfectante}} \left(\frac{mg}{s} \right) \quad (12)$$

Donde:

$D_{\text{desinfectante}}$:	Dosis de desinfectante aplicada
$Q_{\text{extraído de agua}}$:	Flujo de operación del pozo de extracción de agua
$W_{\text{desinfectante}}$:	Flujo de desinfectante a dosificar

La tabla 18 muestra los resultados de $W_{\text{desinfectante}}$ para diferentes dosis de desinfectante. Es importante aclarar que estos flujo de dosificación fueron calculados partiendo de una solución comercial de NaOCl al 13% (ρ 1.21 g/cm³), que es la que actualmente se está utilizando para desinfectar el agua que se extrae del Pozo de la Facultad de Química.

Tabla 18 Flujos de dosificación para diferentes dosis de NaOCl al 13%.

Pozo	Q(L/s)	Dosis de NaOCl (mg/L, como cloro activo)				
		0.5	0.75	1.0	1.5	2.0
		Flujo de dosificación (L/h)				
Química	35	0.40	0.60	0.80	1.20	1.60
Vivero Alto	45	0.51	0.77	1.03	1.54	2.06
Multifamiliar	92	1.05	1.58	2.11	3.16	4.21

Tomando en cuenta los flujos de dosificación de la tabla 18, para la desinfección secundaria, se requieren de cloradores o bombas dosificadoras con capacidad de 1 l/h para los pozos de Facultad de Química y Vivero Alto, y de 2 L/h para el pozo Multifamiliar. Como desinfectante primario la capacidad de los cloradores se incrementaría a 2 y 4 L/h respectivamente, para cubrir los requerimientos de flujo de dosificación del desinfectante.

Con respecto al consumo de desinfectante (NaOCl al 13%), este se calculó a partir del flujo de dosificación ($W_{\text{desinfectante}}$) y los tiempos promedio de operación de los pozos de extracción: Pozo Facultad de Química, 7 h/día; Pozo Vivero Alto, 12 h/día; Pozo Multifamiliar, 16 h/día (información personal, DGOyC). En la tabla 19 se presentan el consumo estimado para las dos alternativas de desinfección, por día, por semana y por mes de operación respectivamente.

Tabla 19 Consumo de NaOCl como desinfectante primario (1.5 mg/L) y secundario (0.75 mg/L) para la desinfección del agua de los pozos de abastecimiento.

Consumo NaOCl	Química		Vivero Alto		Multifamiliar	
	0.75 mg/L	1.50 mg/L	0.75 mg/L	1.50 mg/L	0.75 mg/L	1.50 mg/L
L/día	4.21	8.41	9.27	18.54	25.27	50.53
L/semana	29.47	58.87	64.89	129.78	176.89	353.71
L/mes	117.88	235.48	259.56	519.12	707.56	1414.84

Tiempo de operación promedio de los pozos: Química, 7 h/día; Vivero Alto, 12 h/día; Multifamiliar, 16/día.

Los datos de consumo de desinfectante son de utilidad para definir la capacidad de los tanques reservorios a partir de los cuales será suministrado el desinfectante así como para estimar los gastos en el consumo de reactivo. Al igual que en los casos anteriores, ambos aspectos fueron revisados para los alternativas de desinfección propuestas.

De acuerdo con los datos de consumo de desinfectante de la Tabla 19, para el pozo de Facultad de Química se propone un tanque reservorio de 100L de capacidad, para una frecuencia de reposición de reactivo de aproximadamente tres semanas para la desinfección secundaria y de cada semana para el sistema primario. Para el pozo Vivero Alto se propone un tanque de 200L para una frecuencia de reposición de cada tres semanas para la desinfección secundaria y cada semana para la primaria. Finalmente para el pozo multifamiliar se propone un tanque de 250L con una frecuencia de reposición de una y dos veces a la semana, para la desinfección secundaria y primaria respectivamente.

6.4.3 Resumen de las características de los sistemas de desinfección con hipoclorito de sodio.

Las características generales para las dos alternativas de desinfección con NaOCl evaluadas en la presente tesis se resumen en las tablas 20 y 21 respectivamente.

La sustitución del cloro gas por NaOCl como desinfectante primario en los pozos Vivero Alto y Multifamiliar, y la actualización del sistema de cloración en el pozo Facultad de Química, son actualmente las modificaciones de mayor prioridad para los sistemas de desinfección del Campus Central de la UNAM (PUMAGUA, 2011; DGOyC de la UNAM). Los resultados del presente trabajo contribuyen de forma importante en la definición de las características de los sistemas de desinfección primaria con NaOCl y son la base para la implementación.

Con respecto al sistema alternativo de desinfección, en el cual el NaOCl sería utilizado como desinfectante secundario en combinación con ozono, se continúa

realizando investigaciones sobre la calidad microbiológica del agua a fin de dar mayor soporte a su posible implementación. Como resultado de la presente tesis, se obtuvieron las características generales que debe cubrir el sistema de desinfección secundaria con NaOCl.

Tabla 20 Características del sistema de desinfección primario con NaOCl.

Condiciones	Unidades	Pozo de la Facultad de Química	Pozo Vivero alto	Pozo Multifamiliar
Flujo promedio de operación de los pozos de extracción de agua	L/s	35	45	92
Tiempo de operación promedio por día	h/día	7	12	16
Dosis de NaOCl como cloro activo	mg/L	1.50	1.50	1.50
Tasa de dosificación del desinfectante	L/h	1.20	1.54	3.16
Número de cloradores o bombas dosificadoras + 1 repuesto para todos los pozos	#	1	1	1
Capacidad de bombas dosificadoras (se debe verificar con proveedores)	L/h	2.00	2.00	4.00
Capacidad del tanque reservorio para el desinfectante	L	100	200	250
Periodo de reposición de NaOCl	Veces/semana	1	1	2
Consumo de NaOCl mensual total	L totales/mes	$253.98 + 519.12 + 1,414.84 = 2,187.94$		

Tabla 21 Características del sistema de desinfección secundario con NaOCl.

Condiciones	Unidades	Pozo de la Facultad de Química	Pozo Vivero alto	Pozo Multifamiliar
Flujo promedio de operación de los pozos de extracción de agua	L/s	35	45	92
Tiempo de operación promedio por día	h/día	7	12	16
Dosis de NaOCl como cloro activo	mg/L	0.75	0.75	0.75
Tasa de dosificación del desinfectante	L/h	0.60	0.77	1.58
Número de cloradores o bombas dosificadoras + 1 repuesto para todos los pozos	#	1	1	1
Capacidad de bombas dosificadoras (se debe verificar con proveedores)	L/h	1.00	1.00	2.00
Capacidad del tanque reservorio para el desinfectante	L	100	200	250
Periodo de reposición de NaOCl		Cada 3 semanas	Cada 2 semanas	Una vez a la semana
Consumo de NaOCl mensual total	L totales/mes	117.88 + 259.56 + 707.56 = 1,085		

Conclusiones

El programa de monitoreo utilizado permitió evaluar los niveles de cloro residual libre y la calidad microbiológica del agua potable de la red de distribución y sienta las bases para la implementación de un programa permanente de evaluación de la calidad del agua en el Campus Central Universitario.

De los niveles de cloro residual libre se concluye que, en la mayoría de los sitios evaluados se detectaron valores dentro los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1994; en aquellos sectores hidráulicos en donde el agua se envía directamente a la red después de cloración, la concentración fue ligeramente mayor a la recomendada. En comparación con estudios previos, se registró un incremento significativo en la concentración promedio de cloro, lo que se atribuyen a modificaciones en la operación de la red de distribución.

Con respecto a la calidad microbiológica del agua, se concluye que esta cumple con los requisitos establecidos para su consumo y que los resultados son consistentes con los niveles de cloro residual encontrados.

Con base en los resultados experimentales de cloro residual y los que arrojó la simulación en EPANET, se concluye que bajo las condiciones actuales de operación del sistema de abastecimiento, no se requiere de puntos de recloración en la red de distribución, sin embargo la dosis de desinfectante deben ser ajustadas para evitar problemas de sobre-cloración en los puntos de consumo.

Con respecto al sistema de desinfección secundaria con NaOCl, se determinaron las condiciones y las características generales de operación de los sistemas de cloración necesarias para mantener los residuales de cloro en el agua de la red, para el método de desinfección alternativo, O₃-NaOCl.

Los resultados del presente trabajo contribuyen de forma importante en la definición de las características de los sistemas de desinfección primaria con NaOCl y son la base para la implementación.

Recomendaciones

- Seguir realizando muestreos de la calidad de agua que permitan optimizar el programa de monitoreo y establecerlo de manera permanente.
- Disminuir los niveles de cloración para mantener residuales de cloro óptimos que garanticen la calidad microbiológica en el agua de la red, que se traduzca en beneficios económicos, mejores características organolépticas el agua y reducción del potencial de formación de subproductos de desinfección.
- Homologar las condiciones de operación de la red de abastecimiento y distribución de agua potable para lograr un nivel de residuales de cloro constante y homogéneo.
- Cualquier cambio realizado a las condiciones de operación del sistema de desinfección requerirá ser evaluado en campo.

Referencias.

- I. C.A. Lazcano (1996). Fallas y problemas de la desinfección urbana. SEDAPAL. 12 p.
- II. Castro Hernández G. (2011). Propuestas de mejoras del sistema de desinfección de agua potable en Ciudad Universitaria. Tesis de Licenciatura. UNAM.
- III. Cervantes García E. (2006). Helicobacter pylori e infecciones asociadas. 7p.
- IV. Cofepris, CONAGUA (2010). Lineamientos generales para el monitoreo de cloro residual libre y muestreo bacteriológico en sistemas formales de abastecimiento de agua para uso y consumo humano. 13 p.
- V. CONAGUA (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento. 152 p.
- VI. CONAGUA (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de agua potable. 270p.
- VII. CONAGUA (2010). Estadísticas del agua en México. 258 p.
- VIII. ENOHSA. Fundamentación, Desinfección, Cap. X. 243 p.
- IX. IDMH (2002). EPANET 2.0 en español, Análisis hidráulico y de calidad en redes de distribución de agua, Manual del usuario. 206 p.
- X. ISEM (2007). Manual de procedimientos para la determinación de cloro residual libre en agua para uso y consumo humano en sistemas formales de abastecimiento. 80 p.
- XI. Jenkins David, Snoeyink Vernon L., (2007). Química del agua. Ed. Limusa; México, D.F. P. 429-442.
- XII. Junta de Castilla y León (2009). Manual de tratamientos del agua de consumo humano. 106 p.
- XIII. Keith A. Christman (1998). Cloro. Consejo de química del cloro, Arlington, EUA. 23 p.
- XIV. Knobelsdorf J., Mujeriego R., (1997). Crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua potable: Una revisión bibliográfica. Ingeniería del agua, Vol. 4 Núm. 2. 11 p.
- XV. Mazari Hiriart M. (2003). Bacteria and disinfection byproducts in water from southern Mexico City. 5 p. 129 p.
- XVI. Nava Shimada R; Olivares Watson G; (2011). Desinfección del agua de abastecimiento de Ciudad Universitaria mediante la tecnología de ozono, transferencia de masa y dimensionamiento de una cámara de contacto. Tesis de licenciatura, UNAM. 13 p.
- ◁VII. NOM-013-CNA-2000. Redes de distribución de agua potable,

- especificaciones de hermeticidad y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación, 2003. 21 p.
- VIII. NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000. Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano, Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación, 2000. 8 p.
- XIX. NOM-179-SSA1-1998. Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público. Diario Oficial de la Federación, 2000. 13 p.
- XX. NOM-181-SSA1-1998. Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano, Requisitos sanitarios que deben cumplir las sustancias germicidas para tratamiento de agua, de tipo doméstico. Diario Oficial de la Federación, 2000. 13 p.
- XXI. NOM-230-SSA1-2002. Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano, Requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua, procedimientos sanitarios para el muestreo. Diario Oficial de la Federación, 2003.
- ⊂XII. OMS (2006). Guías para la calidad del agua potable, primer apéndice a la tercera edición, Vol. 1. 408 p.
- XIII. OPS/CEPIS (2005). Procedimiento para la operación y mantenimiento de la red de distribución. 9 p.
- XIV. OPS/CEPIS/PUB (2002). La desinfección del agua. 30 p.
- ⊂XV. OPS-COSUDE (2007). Guía para la instalación de sistemas de desinfección. 33 p.
- XVI. PUMAGUA (2008). Informe final 2008. 191p.
- ⊂VII. PUMAGUA (2009). Avances PUMAGUA 2009. 74 p.
- VIII. PUMAGUA (2009). Anexo, Balance Hidráulico. 283 p.
- XIX. PUMAGUA (2009). Anexo, Calidad del agua. 94 p.
- ⊂XX. PUMAGUA (2010). Base de datos, calidad del agua.
- XXI. PUMAGUA (2010). Propuesta para la actualización de los sistemas de desinfección del agua para uso y consumo humano en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México. Calidad del agua. 18 p.
- ⊂XII. Secretaria distrital de salud de Bogotá (2004). Guías para la prevención, control y vigilancia epidemiológica de infecciones intrahospitalarias. 192 p.
- XIII. Spellman F. R., Drinan Joanne (2000). Manual del agua potable. Ed. Acriba, Zaragoza, España. P. 51-55.
- XIV. UNAM, Secretaria administrativa, Dirección de planeación y evaluación de obras (2010). Ciudad Universitaria, México. Mapa.

- XV. WHO (2003). Nitrate and nitrite in drinking water. WHO/SDE/WSH/04.03/56. 21p.

Anexos.

Anexo 1. Calidad del agua.

En el anexo 1 se presentan los límites máximos permisibles para los contaminantes establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000 para el agua potable, la tabla 22 muestra los contaminantes de tipo microbiológicos, la tabla 23 muestra los contaminantes del tipo físicas y organolépticas, la tabla 24 muestra los contaminantes de tipo químico y la tabla 25 muestra los contaminantes de tipo radioactivos.

Tabla 22 Contaminantes microbiológicos. Anexo 1.

Contaminante	Límite Permissible
Organismos Coliformes Totales	Ausencia
E. coli o coliformes fecales	Ausencia

Tabla 23 Contaminantes físicos y organolépticos. Anexo 1.

Contaminante	Límite Permissible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto
Olor y Sabor	Agradable (se aceptaran aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método

Tabla 24 Contaminantes químicos. Anexo 1.

Característica	Límite Permissible
Aluminio	0.20 mg/L
Arsénico	0.05 mg/L
Bario	0.70 mg/L
Cadmio	0.005 mg/L
Cianuros (como CN ⁻)	0.07 mg/L
Cloro residual libre	0.2 - 1.5 mg/L
Cloruros (como Cl ⁻)	250.00 mg/L
Cobre	2.00 mg/L
Cromo total	0.05 mg/L
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00 mg/L
Fenoles o compuestos fenólicos	0.30 mg/L
Hierro	0.30 mg/L
Fluoruros (como F ⁻)	1.50 mg/L
Manganeso	0.15 mg/L
Mercurio	0.001 mg/L
Nitratos (como N)	10.00 mg/L
Nitritos (como N)	1.00 mg/L
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50 mg/L
pH (potencial de hidrogeno) en unidades de pH	6,5-8,5
Hidrocarburos aromáticos en microorganismo:	
Benceno	10.00 µg/L
Etilbenceno	300.00 µg/L
Tolueno	700.00 µg/L
Xileno	500.00 µg/L
Plaguicidas en microorganismos :	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03 µg/L
Clordano (total de isómeros)	0.20 µg/L
DDT (total de isómeros)	1.00 µg/L
Gamma-HCH (lindano)	2.00 µg/L
Hexaclorobenceno	1.00 µg/L
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03 µg/L
Metoxicloro	20.00 µg/L
2,4-D	30.00 µg/L
Plomo	0.01 mg/L
Sodio	200.00 mg/L
Sólidos Disueltos totales	1000.00 mg/L
Sulfatos (como SO ⁻² ₄)	400.00 mg/L
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50 mg/L
Trihalometanos totales	0.20 mg/L

Yodo residual libre	0.2 - 0.5 mg/L
Zinc	5.00 mg/L

Tabla 25 Contaminantes radioactivos. Anexo 1.

Contaminante	Límite Permisible
Radiactividad alfa global	0.10
Radiactividad beta global	1.00

Anexo 2. Evaluación de la calidad del agua (2008).

En el anexo 2 se presenta la evaluación de la calidad del agua realizada a los pozos, tanque bajo y la red de distribución (Ed.5 del II) durante el 2008 para todos los parámetros establecidos por la NOM-127-SSA1-2000.

Tabla 26 Calidad del agua potable 2008. Anexo 2.

Característica	Límite Permisible	Pozo Química	Pozo Multifamiliar	Pozo Vivero alto	Tanque Bajo	Llave del Ed. 5
Aluminio	0.20 mg/L	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15
Arsénico	0.05 mg/L	0.002	0.0016	0.0018	0.0022	0.0007
Bario	0.70 mg/L	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15	<0.15
Cadmio	0.005 mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Cianuros (como CN ⁻)	0.07 mg/L	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Cloro residual libre	0.2 - 1.5 mg/L	<0.06	<0.06	<0.06	0.3	0.08
Cloruros (como Cl ⁻)	250.00 mg/L	74	45	49	66	46
Cobre	2.00 mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cromo total	0.05 mg/L	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00 mg/L	112	130	107	119	143
Fenoles o compuestos fenólicos	0.30 mg/L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Fierro	0.30 mg/L	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015
Fluoruros (como F ⁻)	1.50 mg/L	0.42	0.16	0.68	<0.01	0.442
Manganeso	0.15 mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Mercurio	0.001 mg/L	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Nitratos (como N)	10.00 mg/L	0.45	1.12	2.5	3.24	9.64

Nitritos (como N)	1.00 mg/L	0.002	0.002	0.002	0.002	<0.001
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50 mg/L	0.32	0.49	0.32	0.32	<0.06
pH (potencial de hidrogeno) en unidades de pH	6,5-8,5	7	7.08	6.97	7.13	6.7
Hidrocarburos aromáticos en microorganismo:						
Benceno	10.00 µg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Etilbenceno	300.00 µg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tolueno	700.00 µg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Xileno	500.00 µg/L	<0.2	<0.2	<0.1	<0.2	<0.2
Plaguicidas en microorganismos :						
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03 µg/L	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Clordano (total de isómeros)	0.20 µg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
DDT (total de isómeros)	1.00 µg/L	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Gamma-HCH (lindano)	2.00 µg/L	<1	<1	<1	<1	<1
Hexaclorobenceno	1.00 µg/L	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03 µg/L	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Metoxicloro	20.00 µg/L	<10	<10	<10	<10	<10
2,4-D	30.00 µg/L	<10	<10	<10	<10	<10
Plomo	0.01 mg/L	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Sodio	200.00 mg/L	35.53	19.89	24.82	28.58	33.87
Sólidos Disueltos totales	1000.00 mg/L	299	303	287	299	327
Sulfatos (como SO ⁻² ₄)	400.00 mg/L	6	27	25	13	17
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50 mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Trihalometanos totales	0.20 mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Yodo residual libre	0.2 - 0.5 mg/L	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Zinc	5.00 mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

Fuente: Tabla elaborada con información publicada en Informe final PUMAGUA 2008.

Anexo 3. Dependencias que integran los sectores hidráulicos.

Sector hidráulico I (Rocha, 2010).

- Centro de información científica y humanística
- Facultad de economía
- Gasolinera Copilco
- IIMAS
- INGEN (edificios 2, 3, 4 y 13)
- CELE
- CENDI
- Centro de ciencias de la atmosfera
- Clínica de odontología
- Dirección general de administración escolar (DGAE)
- Posgrado de arquitectura
- Facultad de medicina
- Facultad de odontología
- Facultad de química
- Facultad de veterinaria
- Hospital de mascotas
- Instituto de química
- Instituto de fisiología celular
- Instituto de geofísica
- Instituto de geografía
- Instituto de geología
- Instituto de neurobiología
- Laboratorio de aguas residuales
- Posgrado de odontología
- Posgrado de psicología
- Psiquiatría y salud mental
- CEPE
- Dirección general de personal
- Dirección general de publicaciones y fomento editorial
- Subdirección de protección a la comunidad
- Talleres de imprenta
- Torre II de humanidades
- Unidad de posgrado
- Instituto de investigaciones biomédicas

- Coordinación de áreas verdes
- Posgrado de derecho
- Anexo de derecho
- Vivero Faustino Miranda

Sector hidráulico II.

- Rectoría
- Biblioteca central
- MUCA
- Zona comercial y gaceta UNAM
- Facultad de arquitectura
- DGOSE
- Facultad de filosofía y letras
- Facultad de derecho
- Anexo de derecho
- Posgrado de derecho
- Coordinación de consejos académicos de área
- Dirección general de servicios médicos
- Dirección general de CCH
- Alberca olímpica
- Canchas deportivas
- Comisión técnica de futbol americano
- Facultad de psicología
- IINGEN (edificios 8, 11, 12 y18)
- Departamento de medicina familiar
- Facultad de ingeniería

Sector hidráulico III.

- Estadio de prácticas “Tapatío Méndez”
- Frontón cerrado
- Escuela nacional de trabajo social
- Anexo de ingeniería

- División de estudios de posgrado
- Facultad de contaduría y administración
- Instituto de ciencias nucleares
- Instituto de física
- Instituto de astronomía
- Instituto de matemáticas
- Programas universitarios
- Coordinación de investigación científica
- IINGEN
- Instituto de investigación en materiales
- Secretaria de investigación y desarrollo
- Facultad de ciencias
- Facultad de química (conjunto D y E)
- Coordinación de unidades abierta y a distancia
- Posgrado de facultad de contaduría y administración
- Dirección general de servicios de computo académico
- Facultad de ciencias políticas y sociales
- Posgrado de facultad de ciencias políticas y sociales
- Instituto de investigaciones antropológicas
- Sistema de universidad abierta
- Centro de instrumentos
- Tienda UNAM
- Dirección general de actividades cinematográficas
- Dirección general de televisión universitaria (TV UNAM)
- Almacén de construcción de la DGOC
- Bodegas de artes visuales y teatro
- Dirección general de bibliotecas

Sector hidráulico IV.

- Casa club del académico
- Coordinación de asesores
- Dirección general de actividades deportivas y recreativas
- Unión de universidades de América latina
- Dirección general de obras y conservación
- Dirección general de relaciones laborales

- Dirección general de proveeduría
- Talleres de conservación
- Estadio olímpico universitario
- Centro de boxeo y levantamiento de pesas
- Medicina del deporte e investigación
- Estación de bomberos
- Multifamiliar de profesores
- PUMITAS

Sector hidráulico V.

- Biblioteca nacional y fondo reservado
- Coordinación de investigación en humanidades
- Instituto de investigaciones sobre la universidad y la educación
- Instituto de investigaciones estéticas e históricas
- Instituto de biología
- Instituto de ecología
- Jardín botánico exterior
- Instituto de investigaciones biomédicas
- Mesa vibradora
- Unidad de seminarios “Ignacio Chávez”
- Instituto de investigaciones filosóficas
- Instituto de investigaciones sociales
- Instituto de investigaciones filológicas
- Instituto de investigaciones económicas
- Instituto de investigaciones jurídicas
- Centro universitario del teatro
- MUCA
- UNIVERSUM
- CCU-Sala de conciertos Netzahualcóyotl
- CCU-Salas cinematográficas José Revueltas
- CCU-Salas cinematográficas Julio Bracho
- CCU-Sala Miguel Covarrubias
- CCU-Sala Carlos Chávez
- CCU-Teatro Juan Ruiz de Alarcón
- CCU-Foro Sor Juana Inés de la Cruz

- Dirección general de planeación
- Dirección general de incorporación y validación
- Oficina zona cultural de la DGOyC
- Almacén de composta de la DGOyC
- Almacén de bibliotecas y hemerotecas
- Taller mecánico
- Oficinas administrativas exteriores
- Dirección general de servicios generales y archivo de la UNAM
- Registro de aspirantes
- Archivo general
- Patronato de la UNAM
- Dirección general de servicios de computo académico- Zona cultural
- Dirección general de publicaciones y fomento editorial- Zona cultural

Anexo 4. Dependencias de CU en listadas por la DGSM.

Dentro del anexo 3 se encuentra las 136 dependencias que se consideraron para realizar la selección de los sitios de monitoreo, en la tabla 27 se pueden apreciar estas, las dependencias sombreadas con color amarillo fueron las obtenidas durante la primera selección.

Tabla 27 Dependencias en listadas por la DGSM. Anexo 3.

#	Institución o Dependencia.
1	ALBERCA OLIMPICA
2	AUDITORIA INTERNA
3	BSE 1 DEPARTAMENTO DE VIGILANCIA
4	CASA CLUB ACADEMICO
5	CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLOGICO
6	CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA
7	CENTRO DE DESARROLLO INFANTIL, CIUDAD UNIVERSITARIA
8	CENTRO DE ENSEÑANZA DE LENGUAS EXTRANJERAS
9	CENTRO DE ENSEÑANZA PARA EXTRANJEROS
10	CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN DISEÑO INDUSTRIAL, EDIFICIO DE POSGRADO
11	CENTRO UNIVERSITARIO DE TEATRO
12	COORDINACIÓN DE DIFUSIÓN CULTURAL
13	COORDINACIÓN DE HUMANIDADES
14	COORDINACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN CIENTIFICA
15	COORDINACIÓN DE UNIVERSIDAD ABIERTA Y EDUCACIÓN A DISTANCIA
16	COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO, EDIFICIO DE POSGRADO
17	DEPARTAMENTO DE MEDICINA FAMILIAR
18	DEPARTAMENTO DE PREVENCIÓN Y COMBATE DE SINIESTROS, ESTACIÓN DE BOMBEROS
19	DEPARTAMENTO DE SALUD AMBIENTAL
20	DEPARTAMENTO DE SALUD MENTAL Y PSIQUIATRÍA
21	DIRECCIÓN GENERAL DE PRESUPUESTO UNIVERSITARIO, PB CONS. ACAD
22	DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS GENERALES
23	DIRECCIÓN DE MEDICINA DEL DEPORTE
24	DIRECCIÓN DE OPERACIONES , AV UNIVERSIDAD

25	DIRECCIÓN DE REALACIONES LABORALES
26	DIRECCIÓN DE SISTEMAS Y SERVICIOS INSTITUCIONALES DGSCA, EDIFICIO IIMAS
27	DIRECCIÓN DE TEATRO
28	DIRECCIÓN DE TEATRO, ZONA CULTURAL
29	DIRECCIÓN GENERAL DE ACTIVIDADES DEPORTIVAS Y RECREATIVAS
30	DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR, EDIFICIO METRO
31	DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR, IMAN
32	DIRECCIÓN GENERAL DE ARTES VISUALES
33	DIRECCIÓN GENERAL DE ASUNTOS DEL PERSONAL ACADEMICO
34	DIRECCIÓN GENERAL DE ASUNTOS JURIDICOS
35	DIRECCIÓN GENERAL DE ATENCIÓN A LA COMUNIDAD ESTUDIANTIL
36	DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS , BIBLIOTECA CENTRAL
37	DIRECCIÓN GENERAL DE COMUNICACIÓN SOCIAL,ZONA COMERCIAL CU
38	DIRECCIÓN GENERAL DE CONTROL E INFORMATICA EDIFICIO B, ZONA CULTURAL
39	DIRECCIÓN GENERAL DE DIVULGACIÓN DE LA CIENCIA
40	DIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE LEGISLACIÓN UNIVERSITARIA, EDIFICIO B ZONA CULTURAL
41	DIRECCIÓN GENERAL DE INCORPORACIÓN Y REVALIDACIÓN DE ESTUDIOS
42	DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS Y CONSERVACIÓN
43	DIRECCIÓN GENERAL DE ORIENTACIÓN Y SERVICIOS EDUCATIVOS
44	DIRECCIÓN GENERAL DE PERSONAL
45	DIRECCIÓN GENERAL DE PLANEACIÓN, EDIFICIO DE ESTUDIOS ADMINISTRATIVOS
46	DIRECCIÓN GENERAL DE PROVEEDURÍA Y ALMACENES
47	DIRECCIÓN GENERAL DE PUBLICACIONES, FOMENTO EDITORIAL AV. IMAN 5
48	DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS MÉDICOS
49	DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS ADMINISTRATIVOS
50	DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS DE COMPUTO ACADÉMICO
51	DIRECCIÓN GENERAL DEL CCH AV. UNIVERSIDAD
52	DIRECCIÓN GENERAL DEL CCH CIRCUITO INTERIOR
53	DIRECCIÓN GENERAL DEL PATRIMONIO UNIVERSITARIO
54	DIRECCIÓN GENERAL E TELEVISIÓN UNIVERSITARIA
55	EDIFICIO DE CÓMPUTO PARA LA INVESTIGACIÓN
56	EDIFICIO DE PROGRAMAS UNIVERSITARIOS
57	ESCUELA NACIONAL DE TRABAJO SOCIAL
58	ESTADIO OLIMPICO DE CIUDAD UNIVERSITARIA
59	ESTADIO TAPATÍO MENDEZ

60	FACULTAD DE CONTADURÍA Y ADMINISTRACIÓN
61	FACULTAD DE CONTADURÍA Y ADMINISTRACIÓN, EDIFICIO DE POSGRADO
62	FACULTAD DE ARQUITECTURA
63	FACULTAD DE CIENCIAS
64	FACULTAD DE CIENCIAS POLITICAS Y SOCIALES
65	FACULTAD DE DERECHO
66	FACULTAD DE DERECHO , EDIFICIO DE POSGRADO
67	FACULTAD DE ECONOMÍA
68	FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
69	FACULTAD DE INGENIERIA, EDIFICIO DE POSGRADO
70	FACULTAD DE INGENIERIA, EDIFICIOS DEL ANEXO
71	FACULTAD DE INGENIERIA, EDIFICIOS PRINCIPALES
72	FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA
73	FACULTAD DE MEDICINA, EDIFICIO DE POSGRADO
74	FACULTAD DE MEDICINA, EDIFICIOS PRINCIPALES
75	FACULTAD DE ODONTOLOGÍA
76	FACULTAD DE ODONTOLOGÍA, EDIFICIO DE POSGRADO
77	FACULTAD DE PSICOLOGÍA
78	FACULTAD DE PSICOLOGÍA, EDIFICIO DE POSGRADO
79	FACULTAD DE QUÍMICA , EDIFICIOS A B Y C
80	FACULTAD DE QUÍMICA , EDIFICIOS D
81	FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO E
82	GIMNASIO Y FRONTÓN CERRADO
83	IMPRESA DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE LA PROVEEDURÍA
84	INSTITUTO DE ECOLOGÍA
85	INSTITUTO DE ASTRONOMÍA
86	INSTITUTO DE BIOLOGÍA
87	INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
88	INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES
89	INSTITUTO DE FÍSICA
90	INSTITUTO DE FISIOLÓGIA CELULAR
91	INSTITUTO DE GEOFÍSICA
92	INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
93	INSTITUTO DE GEOLOGÍA
94	INSTITUTO DE INGENIERÍA
95	INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA UNIVERSIDAD Y LA EDUCACIÓN

96	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ANTROPOLOGICAS
97	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIBLIOGRAFICAS
98	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMEDICAS
99	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONOMICAS CIRCUITO MARIO DE LA CUEVA
100	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES
101	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ESTETICAS
102	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FILOLOGICAS, CIRCUITO MARIO DE LA CUEVA
103	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FILOSÓFICAS, CIRCUITO MARIO DE LA CUEVA
104	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES HISTORICAS
105	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS
106	INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOCIALES, CIRCUITO MARIO DE LA CUEVA
107	INSTITUTO DE MATEMÁTICAS
108	INSTITUTO DE QUÍMICA
109	INSTITUTO EN MATEMÁTICAS APLICADAS Y SISTEMAS
110	JARDÍN BOTÁNICO EXTERIOR
111	JARDÍN BOTÁNICO INTERIOR
112	JARDIN DE NIÑOS
113	MUSEO UNIVERSITARIO DE ARTE CONTEMPÓRANEO ZONA CULTURAL
114	MUSEO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS Y ARTE CIRCUITO INTERIOR
115	OBSERVATORIO METEREOLÓGICO
116	PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
117	SALA NEZAHUALCOYOTL
118	SALAS DE CINE
119	SALAS DE TEATRO
120	SECRETARÍA TÉCNICA DE INTERCAMBIO ACADÉMICO, EDIFICIO DE POSGRADO
121	SUBDIRECCIÓN DE FUTBOL AMERICANO
122	SUBDIRECCIÓN DE SERVICIOS ESPECIALIZADOS, CICH
123	TALLER MECÁNICO DE MANTENIMIENTO
124	TALLERES DE CONSERVACIÓN
125	TANQUE BAJO
126	TEATRO JUAN RUIZ DE ALARCÓN Y FORO SOR JUANA
127	TIENDA METRO CU
128	TORRE DE HUMANIDADES I
129	TORRE DE HUMANIDADES II
130	TORRE DE RECTORÍA
131	UNIDAD BIBLIOGRAFICA

132	UNIDAD COORDINADORA DE CONSEJOS ACADEMICO AREA
133	UNIDAD DE SEMINARIOS
134	UNIÓN DE UNIVERSIDADES DE AMÉRICA LATINA
135	VIVERO ALTO
136	ZONA COMERCIAL DE CIUDAD UNIVERSITARIA