



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE LA AGRESIVIDAD Y LA DUREZA
TOTAL DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE USO INDUSTRIAL, EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE GUATEMALA (REGIÓN I), A TRAVÉS DEL ÍNDICE
DE LANGELIER CONSIDERANDO IONES AJENOS AL SISTEMA
CARBONATO**

Marco Junio Villar Alvarado

Asesorado por el Ing. Msc. Zenón Much Santos

Guatemala, enero de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE LA AGRESIVIDAD Y LA DUREZA
TOTAL DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE USO INDUSTRIAL, EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE GUATEMALA (REGIÓN I), A TRAVÉS DEL ÍNDICE
DE LANGELIER CONSIDERANDO IONES AJENOS AL SISTEMA
CARBONATO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR:

MARCO JUNIO VILLAR ALVARADO

ASESORADO POR EL ING. MSC. ZENÓN MUCH SANTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ENERO DE 2008

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE LA AGRESIVIDAD Y LA DUREZA
TOTAL DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE USO INDUSTRIAL, EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE GUATEMALA (REGIÓN I), A TRAVÉS DEL ÍNDICE
DE LANGELIER CONSIDERANDO IONES AJENOS AL SISTEMA
CARBONATO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 24 de agosto de 2007.

Marco Junio Villar Alvarado

AGRADECIMIENTOS

A todo el personal técnico y administrativo del “Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria *Dra. Alba Tabarini Molina*” de EMPAGUA-ERIS, por su apoyo incondicional. En especial al Ing. Zenón Much Santos, a don Moisés Dubón Fuentes y a la Licda. Isabel Del Rosario Monzón Sevilla.

Al Ing. Jorge Mario Estrada Asturias, por su invaluable apoyo profesional y su excepcional calidad humana.

DEDICO ESTE TRABAJO DE GRADUACIÓN A:

Mis padres:

Alba Lidia Alvarado España

y

Luis Manfredo Villar Anléu

Mi hermana:

Ana Sofía Villar Alvarado

Con mucho amor

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRUDUCCIÓN.....	XIX
JUSTIFICACIÓN.....	XXI
MARCO TEÓRICO.....	XXIII
ANTECEDENTES.....	XXIX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXXI
1. METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS NECESARIOS EN EL CÁLCULO DE LA AGRESIVIDAD Y LA DUREZA TOTAL.....	1
1.1 Metodología para la determinación de la dureza total.....	1
1.2 Metodología para la determinación de Cloruros (Cl ⁻).....	4
1.3 Metodología para la determinación de Sulfatos (SO ₄ ⁻²).....	6
1.4 Metodología para la determinación de Nitratos (NO ₃ ⁻).....	9
1.5 Metodología para la determinación de calcio (Ca ⁺²).....	11
1.6 Metodología para la determinación de sodio (Na ⁺).....	12
1.7 Metodología para la determinación de potasio (K ⁺).....	16
1.8 Metodología para la determinación de la Alcalinidad Total.....	17
1.9 Metodología para la determinación del pH.....	21
1.10 Metodología para la determinación de la temperatura.....	22
1.11 Metodología para la determinación de magnesio (Mg ⁺²).....	23

2. RESULTADOS	25
2.1 Cuadros del Índice de Langelier y la Dureza Total.....	25
2.1.1 Gráficos del Índice de Langelier y la Dureza Total.....	31
2.1.2 Índices de Langelier en función del pH medido.....	33
2.2 Resultados estadísticos de Durezas Totales e Índices de Langelier en el área metropolitana de Guatemala por zonas Geográficas.....	35
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	39
3.1 Discusión acerca de la Dureza Total y la agresividad en el noroeste del área metropolitana de Guatemala.....	39
3.2 Discusión acerca de la Dureza Total y la agresividad en el noreste del área metropolitana de Guatemala.....	40
3.3 Discusión acerca de la Dureza Total y la agresividad en el suroeste del área metropolitana de Guatemala.....	42
3.4 Discusión acerca de la Dureza Total y la agresividad en el sureste del área metropolitana de Guatemala.....	43
CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	51
BIBLIOGRAFÍA	53
Apéndice 1.....	55
Apéndice 2.....	61
Apéndice 3.....	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Índice de Langelier por zonas geográficas en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época de estío. 31
2. Índice de Langelier por zonas geográficas en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época de lluviosa. 31
3. Dureza Total del agua subterránea por zonas geográficas en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época estío. 32
4. Dureza total del agua subterránea por zonas geográficas en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época lluviosa. 32
5. Índices de Langelier del agua de cada pozo en función del pH medido en el área metropolitana de Guatemala en época de estío. 33
6. Índices de Langelier del agua de cada pozo en función del pH medido en el área metropolitana de Guatemala en época lluviosa. 34

7.	Mapa del noroeste del área metropolitana de Guatemala “Ubicación de pozos muestreados en el noroeste”	66
8.	Mapa del noreste del área metropolitana de Guatemala “Ubicación de pozos muestreados en el noreste”	67
9.	Mapa del suroeste del área metropolitana de Guatemala “Ubicación de pozos muestreados en el suroeste”	68
10.	Mapa del sureste del área metropolitana de Guatemala “Ubicación de pozos muestreados en el sureste”	69

TABLAS

I	Clasificación industrial del agua según su Dureza Total (mg/l) como Carbonato de Calcio.	XXVII
II	Clasificación del agua sobre la base del Índice de Langelier y recomendaciones basadas en observaciones profesionales.	XXVIII
III	Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noroeste del área metropolitana de Guatemala.	25
IV	Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noreste del área metropolitana de Guatemala.	26

V	Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noreste del área metropolitana de Guatemala. (Continuación).	27
VI	Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noreste del área metropolitana de Guatemala. (Continuación).	28
VII	Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el suroeste del área metropolitana de Guatemala.	29
VIII	Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el sureste del área metropolitana de Guatemala.	30
IX	Medidas de tendencia central y de dispersión de la Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noroeste del área metropolitana de Guatemala.	35
X	Medidas de tendencia central y de dispersión de la Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noreste del área metropolitana de Guatemala.	35
XI	Medidas de tendencia central y de dispersión de la Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el suroeste del área metropolitana de Guatemala.	36
XII	Medidas de tendencia central y de dispersión de la Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el sureste del área metropolitana de Guatemala.	36

XIII	Medidas de tendencia central y de dispersión de la Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en todas las muestras analizadas (49) del área metropolitana de Guatemala.	37
XIV	Concentraciones catiónicas del agua del área metropolitana de Guatemala en cada pozo en época de estío y época lluviosa (mg/l).	55
XV	Concentraciones catiónicas del agua del área metropolitana de Guatemala en cada pozo en época de estío y época lluviosa (mg/l). (Continuación).	56
XVI	Concentraciones aniónicas del agua del área metropolitana de Guatemala en cada pozo en época de estío y época lluviosa (mg/l).	57
XVII	Concentraciones aniónicas del agua del área metropolitana de Guatemala en cada pozo en época de estío y época lluviosa (mg/l). (Continuación).	58
XVIII	Temperaturas (°C) y pH medidos en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época de estío y época lluviosa.	58
XIX	Temperaturas (°C) y pH medidos en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época de estío y época lluviosa (Continuación).	59

XX	Temperaturas (°C) y pH medidos en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época de estío y época lluviosa (Continuación).	60
XXI	Datos calculados en el agua de cada pozo del área metropolitana de Guatemala para la época de estío.	61
XXII	Datos calculados en el agua de cada pozo del área metropolitana para la época de estío. (Continuación).	62
XXIII	Datos calculados en el agua de cada pozo del área metropolitana para la época lluviosa.	62
XXIV	Datos calculados en el agua de cada pozo del área metropolitana para la época lluviosa. (Continuación).	63
XXV	Datos calculados en el agua de cada pozo del área metropolitana de Guatemala para la época lluviosa. (Continuación).	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Ca^{+2}	Concentración de iones calcio (mg/l)
Mg^{+2}	Concentración de iones magnesio (mg/l)
Na^{+}	Concentración de iones sodio (mg/l)
K^{+}	Concentración de iones potasio (mg/l)
HCO_3^{-}	Concentración de iones bicarbonato (mg/l)
Cl^{-}	Concentración de iones cloruro (mg/l)
SO_4^{-2}	Concentración de iones sulfato (mg/l)
NO_3^{-}	Concentración de iones nitrato (mg/l)
pH	El logaritmo negativo de la actividad del ión hidrónico (H^{+}).
A	$A = 3[\text{Cat}^{2+}] + [\text{Cat}^{+}] + [\text{An}^{2-}]$
B	$B = 4[\text{An}^{2-}] + \frac{3}{2}[\text{An}^{-}] - \frac{1}{2}[\text{Cat}^{+}]$
$[\text{Cat}^{2+}]$	Concentración molar de cationes divalentes
$[\text{Cat}^{+}]$	Concentración molar de cationes monovalentes
$[\text{An}^{2-}]$	Concentración molar de aniones divalentes
$[\text{An}^{-}]$	Concentración molar de aniones monovalentes
μ	Fuerza iónica
ε	$\varepsilon = \frac{\sqrt{\mu}}{1 + 0.9\sqrt{\mu}}$

NO	Noroeste del área metropolitana de Guatemala.
NE	Noreste del área metropolitana de Guatemala.
SO	Suroeste del área metropolitana de Guatemala.
SE	Sureste del área metropolitana de Guatemala.
Kps	Constante del producto de solubilidad del carbonato de calcio.
Ka₂	Segunda constante de disociación del ácido carbónico.
pHs	pH de saturación del agua.
Is	Índice de saturación de Langelier

GLOSARIO

Agua incrustante	Agua que tiende a provocar precipitaciones de carbonato cálcico, y su Índice de Langelier es mayor que cero.
Agua corrosiva	Agua que tiende a disolver precipitados de carbonato cálcico, metales, cemento y productos derivados, y su Índice de Langelier es menor que cero.
Agresividad	Capacidad que poseen ciertas aguas naturales de corroer en frío a metales, calizas, cemento, y productos derivados; depende principalmente del dióxido de carbono libre, alcalinidad y pH.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas; es el Organismo Nacional de Normalización técnica y actividades conexas, según el Decreto No. 1523 del Congreso de la República de Guatemala del 05 de mayo de 1962.
Dureza Total	Es la medida de la concentración total del Calcio y Magnesio expresada como miligramos por litro de carbonato de calcio.

Estío	Estación del año que astronómicamente principia en el solsticio de verano y termina en el equinoccio de otoño.
Fuerza Iónica	Intensidad del campo eléctrico en una solución.
Índice de Langelier	Es la indicación del grado de saturación del carbonato de calcio en el agua. Se define como la diferencia entre el pH real de un agua y el pH hipotético si el agua estuviera en equilibrio con $\text{CaCO}_{3(s)}$. (pHs).
Patrón	Disolución de una sustancia utilizada como referencia al momento de hacer una valoración o estandarización.
pH	Potencial de Hidrógeno; es el logaritmo negativo de la actividad de los iones hidrógeno.
Región Metropolitana	División administrativa de Guatemala que comprende todo el departamento de Guatemala.

Sistema de Carbonatos

Sistema de especies químicas compuesto por dióxido de carbono gaseoso ($\text{CO}_{2(\text{g})}$), $\text{CO}_{2(\text{ac})}$ acuoso o disuelto, ácido carbónico (H_2CO_3), bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) y sólidos que contienen carbonatos.

Tampón

Disolución que está compuesta por el ion común de un ácido débil o una base débil y el mismo ion común en una sal conjugada.

RESUMEN

Se determinó la Dureza Total y la agresividad del agua subterránea de manera cuantitativa en la Región Metropolitana de Guatemala. Para ello se analizó el agua de 49 pozos seleccionados al azar ubicados en ésta área; realizándose los análisis en época de estío y en época lluviosa durante el año 2006, para así evaluar la evolución de los distintos parámetros fisicoquímicos.

En la determinación de todos los parámetros fisicoquímicos se utilizaron métodos sugeridos por los “Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales” de la A.P.H.A.-A.W.W.A.-W.E.F. y Norma COGUANOR NGO 4010 (SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES) Y 29001 (AGUA POTABLE Y SUS DERIVADAS) GUATEMALA.

Para la determinación de la Dureza Total se utilizó el método titulométrico de EDTA, ya que éste mide ambos iones (calcio y magnesio) y puede aplicarse, con las debidas modificaciones, a cualquier clase de agua, además de ser un medio de análisis rápido(Ref.1). En la determinación de la agresividad se hizo uso del método del Índice de Langelier que incluye todos los iones ajenos al sistema de carbonatos ya que es un método cuantitativo que considera la influencia de todos los iones presentes en el agua en concentraciones relevantes.

Se llegó a determinar que en general el agua subterránea en la ciudad capital y área metropolitana tiende a ser corrosiva, y solo algunas zonas del noreste muestran agua ligeramente incrustante.

OBJETIVOS

General

Determinar cuantitativamente la capacidad incrustante y corrosiva del agua subterránea para uso industrial, en el área metropolitana de Guatemala (Región I).

Específicos

1. Clasificar el agua subterránea en las distintas zonas geográficas del área metropolitana de Guatemala atendiendo a su agresividad y Dureza Total haciendo uso del Índice de Langelier modificado por la inclusión de iones ajenos al sistema carbonato.

2. Determinar los siguientes parámetros fisicoquímicos del agua subterránea:

Concentraciones de Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Sulfatos, Nitratos, Cloruros, pH, Alcalinidad Total y Temperatura con base en las normas COGUANOR y los Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y aguas residuales.

INTRODUCCIÓN

Con éste estudio se determinó cuantitativamente la capacidad incrustante y corrosiva (agresividad) del agua subterránea en el área metropolitana de Guatemala (Región I) así como también la dureza total. Para tales motivos, se tomó como campo de estudio el agua de 49 pozos tomados al azar ubicados en dicha área. Se calculó el índice de saturación de Langelier (Is) corregido con la inclusión de iones de influencia importante en el equilibrio carbónico del agua, éste índice nos proporciona información cuantitativa de la agresividad del agua(Ref.2).

Los parámetros necesarios para el cálculo del Índice de Langelier son: pH, Cloruros (Cl^-), Sulfatos (SO_4^{-2}), Nitratos (NO_3^-), Calcio (Ca^{+2}), Potasio (K^{+1}), Magnesio (Mg^{+2}), Sodio (Na^{+1}), Alcalinidad Total, y Temperatura (ver Cáp.1). Todos los parámetros fueron medidos en el “Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria *Dra. Alba Tabarini Molina*” de EMPAGUA-ERIS ubicado en el edificio T-5 de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Para todo ello se realizaron dos muestreos y análisis del agua de cada pozo en dos épocas distintas del año 2006 (estío y época lluviosa), y así se evaluó la evolución de los parámetros fisicoquímicos en función de la época del año. Finalmente, se comparan y discuten las distintas agresividades encontradas en las distintas zonas geográficas.

JUSTIFICACIÓN

El agua es ampliamente utilizada en la mayor parte de los procesos químicos industriales, siendo su calidad requerida función del proceso en el que se utiliza, de allí que sea de suma importancia la caracterización de ésta a través de procedimientos de laboratorio químico. Uno de los problemas más frecuentemente encontrados en la industria es el de corrosión e incrustación en tubos y tuberías, provocando entre otras cosas un aumento en los costos de operación, esto puede evitarse implementando sistemas de tratamiento para el agua, para lo cual se necesita antes caracterizarla como corrosiva o incrustante. Existen varios métodos para lograr esto, uno de ellos es el Índice de Langelier simple, el cual considera solamente el sistema carbonato sin tomar en cuenta la influencia de los iones ajenos, por lo que proporciona una información cualitativa sobre la tendencia corrosiva o incrustante del agua, haciendo muy difícil el diseño preciso de un sistema de tratamiento.

Por tanto, es necesaria la utilización de un método cuantitativo para tal objeto. Este Índice puede y debe utilizarse modificándolo de tal manera que considere la presencia de iones ajenos al sistema carbonato, para así proporcionar una información cuantitativa sobre la capacidad corrosiva o incrustante del agua pudiendo por tanto utilizar esta información en el diseño de un sistema de tratamiento preciso para ésta, y a la vez poder comparar distintos tipos de agua sobre la base de agresividad. Todo esto resulta de suma importancia para aquel que quiera iniciar una pequeña planta en la que el agua sea un elemento básico en su producción para poder decidir el lugar óptimo de ubicación y también prever los gastos en que incurrirá si debe tratarla.

El índice de Langelier, así como el pH de saturación del agua (pH_s), son de gran utilidad no solo para el control del tratamiento de aguas de servicio, sino en la reutilización de aguas residuales y en la caracterización de cuerpos hídricos contaminados para su saneamiento. Sin embargo, para poder usar adecuadamente el pH de saturación (pH_s) en aguas residuales industriales y agrícolas, es necesario modificarlo de manera que incluya de alguna forma la influencia de los iones ajenos al sistema carbonato disueltos en concentraciones relevantes.

MARCO TEÓRICO

El Dióxido de carbono (CO_2) es un ácido débil de gran importancia en las aguas naturales, que proviene tanto de la atmósfera, como de la degradación microbiana de la materia orgánica y de los procesos fotosintéticos. La presencia de minerales carbonatados en los sedimentos en conjunto con el dióxido de carbono (CO_2), generan un efecto de amortiguación sobre el pH del agua, principalmente a través de los dos siguientes equilibrios:



El comportamiento de los contaminantes químicos en las aguas naturales y residuales, es función de las propiedades fisicoquímicas que predominan en éstas. La presencia del dióxido de carbono ($\text{CO}_{2\text{ ac}}$) disuelto y de sus productos de ionización bicarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-}) en los cuerpos hídricos, influye en los equilibrios de precipitación y disolución de compuestos inorgánicos. La concentración de este dióxido de carbono (CO_2) se puede relacionar con la presencia de bicarbonatos; para ello, es conveniente tomar en cuenta la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) necesaria para mantener en disolución el bicarbonato (HCO_3^-) que se encuentra en el agua; este dióxido de carbono (CO_2) se define como dióxido de carbono de equilibrio ($[\text{CO}_2]_{\text{eq}}$). Sin embargo en un sistema natural, por los procesos de producción citados anteriormente, puede existir dióxido de carbono (CO_2) disuelto en mayor o menor concentración respecto a $[\text{CO}_2]_{\text{eq}}$ (Ref.4).

Si se tiene $[\text{CO}_2]_{ac} > [\text{CO}_2]_{eq}$, el excedente de CO_2 podrá reaccionar con los carbonatos presentes para formar más bicarbonatos, según el siguiente equilibrio:



A este dióxido de carbono (CO_2), se le denominará *potencialmente agresivo*, y el agua correspondiente será *agresiva*, favoreciendo las disoluciones, es decir, manteniendo en solución a los contaminantes. Por el contrario, si $[\text{CO}_2]_{ac} < [\text{CO}_2]_{eq}$, el equilibrio se desplazará hacia la izquierda, favoreciendo la precipitación de carbonatos con los cationes presentes; en este caso, el agua será de naturaleza *incrustante*(Ref.2).

Las descargas industriales y agrícolas han generado una contaminación de los cuerpos acuáticos, en particular al incorporar compuestos inorgánicos, como los metales pesados, derivados fosfatados, nitrogenados, etc. Las especies iónicas provenientes de estos contaminantes influyen en la alcalinidad, la electroneutralidad, la salinidad y la fuerza iónica (entre otros). Se ha observado que al aplicar pH_s y por lo tanto I_s , sin considerar la fuerza iónica (μ), a dos aguas con la misma agresividad, éstas pueden tener distintos índices de saturación o, por el contrario, dos aguas con el mismo I_s pueden presentar agresividades diferentes, lo que hace a este índice semicuantitativo. Barceló y Allende han encontrado que un mayor valor de I_s (sin corrección por fuerza iónica), no coincide necesariamente con una mayor agresividad, sino que sólo es útil para definir cualitativamente si el agua es agresiva o incrustante(Ref.1). También, permite calcular el pH que tendrá el agua agresiva al estabilizarse si el exceso de dióxido de carbono (CO_2) se elimina mediante una aeración (inyección de aire), o para el control durante el proceso de desacidificación del agua; pero únicamente en el caso de un tratamiento del agua en una planta tratadora. En un cuerpo hídrico, río, pozo o presa, el interés será más bien el

estudio de la evolución de la calidad del agua y de los equilibrios químicos en el tiempo y/o en el espacio.

Para todo lo anterior, es necesario la obtención de un índice más cuantitativo, donde se consideren formalmente las concentraciones del máximo número de iones disueltos presentes, así como la fuerza iónica, ya que esta influye en los equilibrios químicos(Ref.4).

El relacionar los cocientes de las concentraciones de los iones componentes de cierta especie química para obtener una relación de equilibrio, no sería confiable por su susceptibilidad ante cualquier cambio del medio, como la influencia de otros iones presentes que afectarían los equilibrios químicos; es importante considerar las actividades en lugar de las concentraciones para garantizar realmente una constante de equilibrio, principalmente cuando se conoce la existencia de una multiplicidad de iones en el sistema acuoso. El tener en cuenta lo anterior y considerarlo en el cálculo del índice de Langelier, permite estudios más finos del comportamiento químico de los contaminantes inorgánicos en un cuerpo hídrico y su influencia en la naturaleza y calidad del agua, todo ello a través de las ecuaciones para el pH de saturación (pH_s) e Índice de Langelier siguientes:

pH de saturación

$$\text{pH}_s = \text{pK}_{a2} - \text{pK}_{ps} - \log \frac{(\mu - A)}{3} - \log \frac{2(\mu - B)}{3} + 2.5\varepsilon \quad (4)$$

Donde:

$$\mu = \text{Fuerza Iónica} = \frac{1}{2}[\text{Cat}^+] + 2[\text{Ca}^{2+}] + 2[\text{Cat}^{2+}] + \frac{1}{2}[\text{HCO}_3^-] + \frac{1}{2}[\text{An}^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + 2[\text{An}^{2-}] \quad (5)$$

$$A = 3[\text{Cat}^{2+}] + [\text{Cat}^+] + [\text{An}^{2-}] \quad (6)$$

$[\text{Cat}^{2+}]$ = Concentración molar de cationes divalentes

$[\text{Cat}^+]$ = Concentración molar de cationes monovalentes

$[\text{An}^{2-}]$ = Concentración molar de aniones divalentes

$$B = 4[\text{An}^{2-}] + \frac{3}{2}[\text{An}^-] - \frac{1}{2}[\text{Cat}^+] \quad (7)$$

$[\text{An}^-]$ = Concentración molar de aniones monovalentes

$[\text{Cat}^+]$ = Concentración molar de cationes monovalentes

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\mu}}{1 + 0.9\sqrt{\mu}} \quad (8)$$

Segunda constante ácida de disociación del ácido carbónico.

$$K_{a_2} = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{-2}]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad (9)$$

Constante del producto de solubilidad del carbonato de calcio.

$$K_{ps} = [\text{CO}_3^{-2}][\text{Ca}^{+2}] \quad (10)$$

Índice de Langelier

$$I_s = \text{pH} - \text{pH}_s \quad (11)$$

pH = pH experimental.

pH_s = pH de saturación.

Con relación a la dureza, se sabe que ésta es una característica del agua debida principalmente a su contenido de carbonatos y sulfatos, y ocasionalmente a los nitratos y cloruros de calcio, magnesio y hierro, que hace que el jabón forme grumos en el agua, que se consume más jabón, y se depositen incrustaciones en las calderas, además produce efectos perjudiciales en algunos procesos industriales, y a veces le da sabor indeseable al agua. Generalmente se determina por el contenido de calcio y magnesio en el agua, y se expresa como carbonato de calcio equivalente(Ref.3).

La dureza del agua para uso industrial se clasifica generalmente de la siguiente forma:

Tabla I. Clasificación industrial del agua, según su Dureza Total (mg/l) como Carbonato de Calcio.

Dureza Total (mg/l como Carbonato de Calcio)	Clasificación del agua
0-50	Agua Blanda
50-150	Agua moderadamente dura
150-300	Agua dura
más de 300	Agua muy dura

Fuente: Víctor Cordón. **Determinación de la dureza total del agua y del Índice de Langelier del agua para uso industrial de los pozos de la Empresa Municipal de Agua ubicados en la Ciudad de Guatemala.** Tesis Ing. Química. Pág.23.

Originalmente, los criterios de pH (pH_s) e índice de saturación (Is) de Langelier, este último también conocido como índice de Langelier, se utilizaron para el control en el tratamiento de las aguas naturales que se empleaban en servicio doméstico (potable) y en la industria, mediante su caracterización en incrustantes o agresivas en función de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} y del sistema carbonato(Ref.1).

Otros investigadores modificaron este índice con el objeto de considerar interferencias debidas a sulfatos o iones alcalinos, por ejemplo, en el tratamiento de aguas residuales de origen minero. Sin embargo, estas modificaciones se establecieron en forma empírica(Ref.1).

La clasificación del agua en corrosiva o incrustante, según el Índice de Saturación de Langelier es de la siguiente forma:

Tabla II. Clasificación del agua sobre la base del Índice de Langelier y recomendaciones generales.

Índice de Langelier	Descripción del agua	Recomendación General
-0.96 o menor	Corrosiva	Necesita tratamiento
-0.95 a -0.51	Moderadamente corrosiva	Necesita tratamiento
-0.50 a -0.02	Ligeramente corrosiva	Probable tratamiento
Cero	corrosión e incrustación mínimos.	No necesita tratamiento
0.02 a 0.50	Ligeramente incrustante	Probable no-tratamiento
0.51 a 0.95	Moderadamente incrustante	Probable tratamiento
0.96 o mayor	Incrustante.	Necesita tratamiento

Fuente: Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences, <http://www.water-research.net/corrosion.htm>.

ANTECEDENTES

Se han realizado varios estudios acerca de la dureza del agua en Guatemala. El primero se realizó en 1967 por Magdiel Escobar Archila titulado “Consideraciones sobre la Dureza del Agua”. El enfoque se hizo a toda la República, y los datos se obtuvieron del archivo del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Dirección General de Obras Públicas. Se estudió el tipo de industrias que utilizan agua en la Ciudad Capital de Guatemala, pero no se presentaron datos de dureza ni de agresividad.

El segundo estudio lo realizó Carlos Alfredo Fernández Erazo en 1985, titulado “Investigación de la Calidad del Agua desde el punto de vista Químico Sanitario en la Ciudad de Guatemala”. Se realizó a nivel República. El tercer estudio fue realizado por Víctor Ernesto Cordón Orellana en 1996, titulado “Determinación de la Dureza Total y del Índice de Langelier del agua para uso industrial de los pozos de la Empresa Municipal de Agua ubicados en la Ciudad de Guatemala”. En éste caso se determinó la dureza total y la agresividad del agua de manera cualitativa en función de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} y del sistema carbonato en 25 pozos de la Empresa Municipal de Agua de Guatemala (EMPAGUA) ubicados en la Ciudad Capital, y se realizó un solo muestreo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

No existe información actualizada y de carácter cuantitativo acerca de la agresividad y la dureza del agua subterránea en el área metropolitana que esté al alcance del pequeño industrial e inversionista guatemalteco.

Al determinar la dureza total y la agresividad del agua subterránea de manera cuantitativa, el nuevo empresario podrá decidir el lugar óptimo en la ubicación de una nueva planta de producción que utilice agua en su proceso, así como también, podrá prever los gastos de tratamiento. Además, al tomar en cuenta los iones ajenos al sistema carbonato se tendrá información del comportamiento químico de los contaminantes inorgánicos en el agua subterránea y su influencia en la naturaleza y calidad del agua.

1. METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS NECESARIOS EN EL CÁLCULO DE LA AGRESIVIDAD Y LA DUREZA TOTAL.

Los parámetros fisicoquímicos necesarios para el cálculo de la agresividad y la Dureza Total son: pH, Cloruros (Cl^-), Sulfatos (SO_4^{-2}), Nitratos (NO_3^-), Calcio (Ca^{+2}), Potasio (K^{+1}), Magnesio (Mg^{+2}), Sodio (Na^{+1}), Alcalinidad Total, y Temperatura.

1.1 Metodología para la determinación de la dureza total (Ref. 1)

Nombre del método: 2340 DUREZA.

Número del método: 2340 C.

Procedimiento: Método titulométrico de EDTA 2340 C.

Reactivos:

- **Solución tampón**

Reactivos:

Cloruro amónico (NH_4Cl), hidróxido de amonio concentrado (NH_4OH), sal de magnesio de EDTA, agua destilada.

Preparación: Disuélvase 16,9 g de cloruro amónico (NH_4Cl) en 143 ml de hidróxido de amonio (NH_4OH) concentrado. Añádase 1,25 g de sal de magnesio de EDTA (disponible en el mercado) y dilúyase hasta 250 ml de agua destilada.

- **Indicador**

Negro de eriocromo T

Sal sódica del ácido 1-(1-hidroxí-2-naftilazo)-5-nitro-2-naftol-4-sulfónico. No.203 en el índice de color.

Preparación: Disuélvase 0,5 g de colorante en 100 g de 2,2',2''-nitrilotrietanol (también llamado trietanolamina) o 2-metoximetanol (también llamado etilenglicol-monometiléter). Añádase 2 gotas por 50 ml de solución a titular. Si es necesario, ajústese el volumen.

- **Titulante EDTA estándar, 0,01M**

Preparación: Se pesan 3,723 g de etilendiaminotetracetato disódico trihidrato, grado reactivo analítico, también llamado (etilenodinitrilo) sal disódica del ácido tetraacético (EDTA); a continuación se disuelve en agua destilada hasta 1.000 ml. Estandarícese frente a solución de calcio estándar como se describe a continuación.

- **Solución de calcio estándar**

Preparación: Se pesan 1,000 g de polvo de carbonato de calcio anhidro (CaCO_3) (estándar principal o reactivo especial, bajo en metales pesados, álcalis y magnesio) en un erlenmeyer de 500 ml. Colóquese un embudo en el cuello del matraz y añádase, poco a poco, 1 + 1 HCl hasta la disolución total de CaCO_3 . Añádanse 200 ml de agua destilada y hágase hervir durante unos minutos para expeler el dióxido de carbono (CO_2). Enfríese, añádase unas gotas de indicador rojo de metilo y ajústese al color naranja intermedio por adición de hidróxido de amonio (NH_4OH) 3N o 1 + 1 HCl, según se requiera. Transvátese cuantitativamente y dilúyase hasta 1.000 ml con agua destilada; 1 ml = 1,0 mg de CaCO_3 .

- **Hidróxido sódico, NaOH, 0,1N.**

Procedimiento:

- **Titulación de muestras**

Selecciónese un volumen de muestra que requiera menos de 15 ml de reactivo EDTA y realícese la titulación en cinco minutos, medidos a partir del momento de la adición del tampón.

Dilúyanse 25 ml de muestra hasta alrededor de 50 ml de agua destilada en una batea de porcelana u otro recipiente adecuado. Añádanse entre 1 y 2 ml de solución tampón. Por lo general, 1 ml será suficiente para dar un pH de 10,0 a 10,1.

Añádase una o dos gotas de solución indicadora o una cantidad adecuada del reactivo en polvo seco. Poco a poco, añádase titulante EDTA estándar, removiendo continuamente, hasta que desaparezcan los últimos matices rojizos. Añádanse las últimas gotas en intervalos de 3-5 segundos. En el punto final, la solución suele ser azul. Se recomienda utilizar luz natural o una lámpara fluorescente de luz día.

Cálculo:

Dureza (EDTA) como mg de $\text{CaCO}_3/\text{l} = (\text{C} \times \text{D} \times 1.000) / \text{ml de muestra}$.

Donde:

C = ml de titulación para la muestra,

D = mg CaCO_3 equivalente a 1,0 ml de titulante EDTA.

1.2 Metodología para la determinación de Cloruros (Cl⁻) (Ref.1)

Nombre del método: 4500-Cl⁻ CLORURO.

Número del método: 4500-Cl⁻ B.

Procedimiento: Método Argentométrico 4500 - Cl⁻ B.

Instrumental: Erlenmeyer, 250 ml., Bureta, 50 ml.

Reactivos y Patrones:

- **Solución indicadora de cromato potásico:**

Reactivos:

cromato potásico (K₂CrO₄), agua destilada, nitrato de plata (AgNO₃).

Preparación: Disuélvase 50 g de K₂CrO₄ en un poco de agua destilada.

Añádase solución de nitrato de plata hasta que se forme un claro precipitado rojo. Déjese reposar 12 horas, fíltrese y dilúyase a 1 litro con agua destilada.

- **Titulante de nitrato de plata patrón, 0,0141M (0,0141N):**

Reactivos:

cloruro de sodio (NaCl), nitrato de plata (AgNO₃), agua destilada.

Preparación: disuélvase 2,395 g de AgNO₃ en agua destilada y dilúyase a 1.000 ml. Estandarícese frente a NaCl por el procedimiento descrito más adelante; 1,00 ml = 500 μg Cl⁻. Consérvese en frasco topacio.

- **Coruro de sodio patrón, 0,0141M, (0,0141N):**

Reactivos:

cloruro de sodio (NaCl), agua destilada.

Preparación: Disuélvase 824,0 mg de NaCl (Secado a 140 °C) en agua destilada y dilúyase a 1.000 ml; 1,00 ml = 500 μg Cl⁻.

- **Reactivos especiales para eliminación de interferencias:**

Suspensión de hidróxido de aluminio:

Reactivos:

sulfato aluminico potásico ($\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) o sulfato aluminico amónico ($\text{AlNH}_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), agua destilada, hidróxido de amonio concentrado (NH_4OH).

Preparación: Disuélvase 125 g de sulfato aluminico potásico ($\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) o sulfato aluminico amónico ($\text{AlNH}_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), en 1 litro de agua destilada. Caliéntese a 60 °C y añádanse 55 ml de hidróxido de amonio concentrado (NH_4OH) lentamente y con agitación. Déjese reposar durante alrededor de 1 hora, transfírase a un frasco grande y lávese el precipitado por adiciones sucesivas de agua destilada, mezclando bien y decantando. Cuando está recién preparada, la suspensión ocupa un volumen aproximado de 1 litro.

Solución indicadora de fenolftaleína.

Hidróxido sódico, NaOH 1N.

Ácido sulfúrico, H₂SO₄ 1N.

Peróxido de hidrógeno, H₂O₂, 30 por 100.

Procedimiento:

- ***Preparación de la muestra:***

Utilícese una muestra de 100 ml o una porción adecuada diluida a 100 ml. Si la muestra tiene mucho color, añádanse 3 ml de suspensión de $\text{Al}(\text{OH})_3$, mézclese, déjese sedimentar y fíltrese.

Si hubiera sulfuro, sulfito o tiosulfato presentes, añádase 1 ml de H_2O_2 y agítese durante 1 minuto.

- ***Titulación :***

Valórese directamente las muestras con pH entre 7 y 10.

Ajústese el pH a 7 o 10 con H_2SO_4 o NaOH , si no estuviera en esa zona.

Añádase 1,0 ml de solución indicadora de K_2CrO_4 . Titúlese con $AgNO_3$ patrón hasta un punto final amarillo rosado, con un criterio constante relativo al punto final.

Estandarícese el $AgNO_3$ titulante y establézcase el valor del blanco de reactivos por el método de titulación descrito anteriormente. Lo usual es un blanco de 0,2 a 0,3 ml.

Cálculos:

$$\text{mg Cl}^- / l = [(C - D) \times N \times 35.450] / \text{ml muestra.}$$

Donde:

C = ml valoración para la muestra,

D = ml valoración para el blanco, y

N = normalidad de $AgNO_3$.

1.3 Metodología para la determinación de Sulfatos (SO_4^{-2}) (Ref.1)

Nombre del método: 4500- SO_4^{-2} SULFATO.

Número del método: 4500.

Procedimiento: Método turbidimétrico 4500- SO_4^{-2} E.

Instrumental:

a) Agitador magnético.

b) Fotómetro: se requiere uno de los siguientes en el orden de preferencia dado:

1. *Nefelómetro*

2. *Espectrofotómetro*, para uso a 420 nm, con un recorrido de luz de 2,5 a 10 cm.

3. *Fotómetro de filtro*, provisto de un filtro violeta cuya máxima transmitancia esté aproximada a 420 nm y recorrido de luz de 2,5 a 10 cm.

c) Cronómetro o reloj eléctrico.

d) Cuchara de medida, con capacidad de 0,2 a 0,3 ml.

Reactivos y Patrones:

- **Solución tampón A:**

Reactivos:

cloruro de magnesio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), acetato de sodio ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), nitrato potásico (KNO_3), ácido acético (CH_3COOH) (99 por 100), agua destilada.

Preparación: Disuélvase 30 g de cloruro de magnesio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 5 g de acetato de sodio ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$); 1,0 g de nitrato potásico (KNO_3), y 20 ml de ácido acético (CH_3COOH) (99 por 100), en 500 ml de agua destilada y complétese a 1.000 ml.

- **Solución tampón B:**

(requerida cuando la concentración de SO_4^{2-} en la muestra es inferior a 10 mg/l).

Reactivos:

Son necesarios los mismos reactivos utilizados en la preparación de la solución tampón A y sulfato de sodio (Na_2SO_4).

Preparación: Disuélvase 30 g de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 5 g de $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; 1,0 g de KNO_3 ; 0,111 g de Na_2SO_4 , y 20 ml de ácido acético (99 por 100), en 500 ml de agua destilada, completando a 1.000 ml.

- **Cloruro de bario**

BaCl_2 , cristales, malla 20 a 30. En la estandarización se produce una turbidez uniforme con este rango de malla y el tampón apropiado.

- **Solución patrón de sulfato**

Reactivos:

sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4), agua destilada

Preparación: Prepárese una solución patrón de sulfato como se describe a continuación; 1,00 ml = 10 $\mu\text{g SO}_4^{-2}$.

Disuélvase 0,1479 g de sulfato e sodio anhidro (Na_2SO_4) en aguadestilada y dilúyase a 1.000 ml.

Procedimiento:

- ***Formación de turbidez con sulfato de bario:***

Mídase 100 ml de muestra o una porción adecuada llevada a 100 ml, en un erlenmeyer de 250 ml. Añádanse 20 ml de solución tampón y mézclese en un agitador. Mientras se agita, añádase una cucharada de cristales de cloruro de bario (BaCl_2), empezando el recuento de tiempo inmediatamente. Agítase durante 60 +/- 2 segundos a velocidad constante.

- ***Medida de la turbidez del sulfato de bario:***

Tras finalizar el período de agitación, viértase la solución en la cubeta del fotómetro y mézclase la turbidez a los 5 +/- 0,5 minutos.

- ***Preparación de la curva de calibración***

Calcúlese la concentración de sulfato SO_4^{-2} en la muestra comparando la lectura de la turbidez con una curva de calibrado preparada sometiendo los patrones de sulfato al método completo. Espáciense los patrones a incrementos de 5 mg/l en el rango de 0 a 40 mg SO_4^{-2} /l. Por encima de 40 mg/l, la precisión disminuye y las suspensiones de sulfato de bario (BaSO_4) pierden estabilidad. Compruébese la fiabilidad de la curva de calibrado, llevando un patrón en paralelo con cada tres o cuatro muestras.

- ***Corrección para el color y turbidez de la muestra***

Corrójase el color y turbidez realizando blancos a los que no se ha añadido cloruro de bario (BaCl_2).

Cálculo:

$$\text{mg SO}_4^{-2}/\text{l} = (\text{mg SO}_4^{-2} \times 1.000) / \text{ml muestra.}$$

Si se había utilizado la solución tampón A, determínese la concentración de sulfatos (SO_4^{-2}) directamente a partir de la curva de calibrado, tras sustraer la absorbancia de la muestra antes de añadir cloruro de bario (BaCl_2). Si se utilizó la solución tampón B, sustráigase la concentración de sulfato SO_4^{-2} del blanco a partir de la concentración aparente de sulfato SO_4^{-2} , dado que la curva de calibrado no es una línea recta, esto no es equivalente a sustraer la absorbancia del blanco de la absorbancia de la muestra.

1.4 Metodología para la determinación de Nitratos (NO_3^-) (Ref.1)

Nombre del método: 4500- NO_3^- NITRÓGENO (NITRATO).

Número del método: 4500- NO_3^- B.

Procedimiento: Método espectrométrico ultravioleta selectivo 4500- NO_3^- B.

Instrumental: Espectrofotómetro, para uso a 220 nm y 275 nm con cubetas de sílice iguales, de 1 cm de recorrido de luz o más.

Reactivos:

- **Agua exenta de nitrato**

Utilícese agua redestilada o destilada, desionizada, de la máxima pureza para preparar todas las soluciones y diluciones.

- **Solución madre de nitrato**

Reactivos:

Nitrato potásico (KNO_3).

Preparación: Séquese nitrato potásico (KNO_3) en un horno a $105\text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Disuélvase 0,7218 g en agua y dilúyase a 1.000 ml; 1,00 ml = 100 $\mu\text{g NO}_3^-$ -N. Consérvese con 2 ml de CHCl_3 /l. Esta solución es estable durante un mínimo de 6 meses.

- **Solución intermedia de nitrato**

Reactivos:

Solución madre de nitrato, agua exenta de nitrato.

Preparación: Dilúyase 100 ml de solución madre de nitrato a 1.000 ml con agua; 1,00 ml = 10,0 $\mu\text{g NO}_3^-$ -N. Consérvese con 2 ml de CHCl_3 /l. Esta solución es estable durante 6 meses.

- **Solución de ácido clorhídrico, HCl 1N.**

Procedimiento:

- **Tratamiento de la muestra**

Sobre 50 ml de muestra transparente, filtrada si fuera preciso, añádase 1 ml de solución de ácido clorhídrico (HCl) y mézclese bien.

- **Preparación de la curva patrón**

Prepárense estándares de calibrado de nitrato (NO_3^-) en el rango de 0 a 7 mg NO_3^- -N/l por dilución a 50 ml de los siguientes volúmenes de solución intermedia de nitrato: 0, 1,00, 2,00, 4,00, 7,00..., 35,0 ml. Trátense los patrones de nitrato (NO_3^-) del mismo modo que las muestras.

- **Medida espectrofotométrica**

Léase la absorbancia o transmitancia frente a agua redestilada, ajustada a absorbancia cero o transmitancia 100 por 100. Utilícese la longitud de onda 220 nm para obtener la lectura NO_3^- y 275 nm para determinar la interferencia debida a materia orgánica disuelta.

Cálculo:

Para muestras y patrones, réstese dos veces la absorbancia leída a 275 nm de la lectura a 220 nm, para obtener la absorbancia debida a NO_3^- . Trácese la curva patrón comparando la absorbancia debida a NO_3^- con la concentración de NO_3^- -N del patrón. Utilizando las absorbancias corregidas de la muestra, obténgase la concentración directamente a partir de la curva patrón. Nota: Si el valor de corrección supera el 10 por 100 de la lectura a 220 nm, no utilizar este método.

1.5 Metodología para la determinación de calcio (Ca^{+2}) (Ref.1).

Nombre del método: 3500-Ca CALCIO.

Número del método: 3500-Ca D.

Procedimiento: Método titulométrico de EDTA 3500 - Ca D.

Reactivos:

- ***Hidróxido de sodio, NaOH 1N.***

- ***Indicadores:***

Indicador murexida (purpurato de amonio).

Este indicador cambia de rosa a púrpura en el punto final.

Preparación: Disuelva 150 mg de colorante en 100 g de etilenglicol absoluto. Las soluciones acuosas del colorante no son estables más de 1 día. Una mezcla molida del polvo colorante y cloruro sódico (NaCl) resulta una forma estable del indicador. Preparece mezclando 200 mg de murexida con 100 g de cloruro sódico sólido (NaCl) y tritúrese la mezcla hasta 40 a 50 mallas. Titúlese inmediatamente de añadir el indicador, ya que este es inestable en condiciones alcalinas.

Facilítese el reconocimiento del punto final preparando un blanco de comparación que contenga 2,0 ml de solución de hidróxido de sodio (NaOH), 0,2 g de mezcla sólida de indicador (o de 1 a 2 gotas si se emplea una solución) y suficiente reactivo de titulación EDTA estándar (0,05 a 0,10 ml) para producir un cambio de color.

Indicador azul negro de eriocromo R

Prepárese una forma estable del indicador triturando juntos en un mortero 200 mg del colorante pulverizado y 100 g de NaCl sólido hasta 40 a 60 mallas. Guárdese en un frasco herméticamente cerrado. Utilícese 0,2 g de la mezcla molida para la titulación de la misma forma que para el indicador murexida. Durante la titulación, el color cambia de rojo a azul puro, pasando por púrpura y púrpura azulado, sin trazas de tonos rojizos o púrpuras. El pH de algunas aguas debe elevarse a 14 (en vez de 12-13) empleado NaOH 8N para conseguir un buen cambio de color.

Reactivo de titulación estándar EDTA, 0,01M

Prepárese un reactivo de titulación estándar tal como se ha descrito para el método de determinación de dureza total con EDTA (sección 1.1). El reactivo de titulación estándar EDTA 0,0100M equivale a 400,8 µg Ca/1,00 ml.

1.6 Metodología para la determinación de sodio (Na⁺) (Ref.1)

Nombre del método:	3500-Na SODIO.
Número del método:	3500-Na D.
Procedimiento:	Método fotométrico de emisión de llama 3500-Na D.
Instrumental:	1) Fotómetro de llama (de lectura directa o tipo patrón interno) o espectrómetro de absorción atómica en la modalidad de emisión de llama.

2) Material de vidrio: Enjuáguese todo el material de vidrio con HNO_3 1 + 15 y a continuación con varias porciones de agua destilada desionizada.

Reactivos y Patrones:

Con objeto de hacer mínima la adsorción de sodio, conviene almacenar todas las soluciones en botellas de plástico. Utilícense recipientes pequeños para reducir la cantidad de elemento seco que puede quedar en las paredes de la botella cuando se vierte la solución. Agítese cuidadosamente el recipiente para arrastrar las sales acumuladas en las paredes, antes de verter la solución.

- ***Agua destilada desionizada***

Utilícese agua destilada desionizada para preparar todos los reactivos y patrones de calibración, así como para diluciones.

- ***Solución madre de sodio***

Preparación: Disuélvase 2,542 g de NaCl secados a 140 °C y dilúyase con agua hasta 1.000 ml; 1,00 ml = 1,00 mg Na.

- ***Solución de sodio intermedia***

Dilúyase 10,00 ml de solución madre de sodio hasta 100,0 ml empleando agua; 1,00 ml = 100 µg de Na. Empléese la solución intermedia para preparar una curva de calibración en el intervalo de sodio de 1 a 10 mg/l.

- ***Solución patrón de sodio***

Dilúyanse 10,00 ml de solución de sodio intermedia hasta 100 ml con agua; 1,00 ml = 10,0 µg de Na. Utilícese esta solución para preparar una curva de calibración en el intervalo de 0,1 a 1,0 mg/l.

- ***Solución patrón de litio***

Reactivos:

Cloruro de litio (LiCl): Déjese secar toda la noche el LiCl en un horno a 105 °C. Pésele rápidamente 6,109 g, disuélvanse en agua y dilúyanse hasta 1.000 ml.

Preparación: Utilícese cloruro de litio para preparar una solución patrón de litio con 1,00 mg Li/1,00 ml.

Procedimiento:

- ***Precauciones***

Colóquese el instrumento en un área alejada de la luz directa del sol o la luz constante emitida por un portalámpara, y sin que esté expuesto a corrientes, polvo o humo de tabaco. Debe evitarse la contaminación por corchos, papel de filtro, transpiración, jabón, limpiadores, mezclas de limpieza y enjuagado inadecuado del aparato.

- ***Funcionamiento del instrumento***

Es imposible dar instrucciones detalladas de su funcionamiento, debido a las diferencias entre formas y modelos de instrumentos. Lo mejor es seguir las instrucciones del fabricante para seleccionar la célula fotoeléctrica y longitud de onda adecuadas, ajuste de la anchura de rendija, y sensibilidad, combustible apropiado y presiones de aire u oxígeno, así como las etapas de calentamiento, corrección de interferencias y fondo de llama, lavado del mechero, ignición de la muestra y medida de la intensidad de emisión.

- ***Medida de la intensidad directa***

Prepárese un blanco y patrones de calibración de sodio con cantidades graduadas en cualquiera de los siguientes intervalos aplicables: 0 a 1,0, 0 a 10 ó 0 a 100 mg/l. Comiencese con el patrón de calibración más alto y sígase trabajando hasta el más diluido, midiéndose la emisión a 589 nm.

Repítase la operación con patrones de calibración y muestras las veces necesarias para asegurar una lectura media fiable para cada solución. Trácese una curva de calibración a partir de los patrones de sodio. Determínese la concentración de sodio de la muestra con la curva de calibración.

- **Medida con patrón interno**

A un volumen cuidadosamente medido de muestra (o porción diluida), de cada patrón de calibración de sodio y de un blanco, añádase, empleando una pipeta volumétrica, un volumen apropiado de solución patrón de litio. Procédase a continuación a medir la intensidad directa.

- **Aproximación de horquillado**

Selecciónese y prepárese, a partir de la curva de calibración, patrones de sodio que delimiten los márgenes de la intensidad de emisión de la muestra. Determínense las intensidades de emisión de los patrones de delimitación de márgenes (un patrón de sodio ligeramente inferior y el otro ligeramente superior que la muestra) y de la muestra lo más simultáneamente posible. Repítase la determinación sobre los patrones de delimitación de márgenes y la muestra.

Cálculo:

- **Por referencia directa a la curva de calibración**

$\text{mg Na/l} = (\text{mg Na/l en la porción}) \times D$.

- **Por delimitación de márgenes**

$$\text{mgNa} / l = \left[\frac{(B - A)(s - a)}{(b - a)} + A \right] D$$

Donde:

B = mg Na/l en el patrón superior de delimitación de márgenes,

A = mg Na/l en el patrón inferior de delimitación de márgenes,
b = Intensidad de emisión del patrón superior de delimitación de márgenes,
a = Intensidad de emisión del patrón inferior de delimitación de márgenes,
s = Intensidad de emisión de la muestra, y
D = relación de dilución = (ml muestra + ml de agua destilada)/ ml muestra.

1.7 Metodología para la determinación de potasio (K^+) (Ref.1)

Nombre del método: 3500-K POTASIO.
Número del método: 3500-K D.
Procedimiento: Método fotométrico de llama 3500-K D.
Instrumental: Utilícese los mismos instrumentos utilizados en la determinación de sodio (ver sección 1.6).

Reactivos y Patrones:

Con objeto de reducir al mínimo la captación de potasio, guárdense todas las soluciones en frascos de plástico. Utilícense recipientes pequeños para reducir la cantidad de elemento seco que puede quedar en las paredes del frasco cuando se vierte la solución. Sacúdase cuidadosamente cada recipiente para arrastrar las sales acumuladas en las paredes antes del vertido.

- **Agua destilada desionizada**

Utilícese este agua para preparar todos los reactivos y estándares de calibración y como agua de dilución.

- **Solución de potasio de reserva**

Dilúyase 1,9707 g de cloruro de potasio (KCl) secado a 110 °C y dilúyase con agua hasta 1.000 ml; 1 ml = 1,00 mg K.

- ***Solución de potasio intermedia***

Dilúyase 10,0 ml de solución de potasio de reserva hasta 100 ml empleando agua; 1,00 ml = 0,100 mg K. Utilícese esta solución para preparar una curva de calibración en el intervalo de 1 a 10 mg de potasio/l.

- ***Solución de potasio patrón***

Dilúyase 10,0 ml de solución de potasio intermedia con agua hasta 100 ml; 1,00 ml = 0,010 mg K. Utilícese esta solución para preparar la curva de calibración en el intervalo de 0,1 a 1,0 mg de potasio/l.

- ***Solución patrón de litio***

Realícese de la misma manera que la solución patrón de litio en la determinación de sodio (ver sección 1.6).

Procedimiento:

Determinése en la forma descrita para la determinación de sodio (ver sección 1.6), pero midiendo la intensidad de emisión a 766,5 nm.

Cálculo:

Véase sección 1.6 (cálculo).

1.8 Metodología para la determinación de la Alcalinidad Total(Ref.1)

Nombre del método: 2320 ALCALINIDAD.

Número del método: 2320 B.

Procedimiento: Método de titulación 2320 B.

Instrumental:

- ***Titulador electrométrico***

Utilícese cualquier medidor de pH disponible en el mercado o un titulador eléctrico provisto de un electrodo de cristal y que pueda ser leído hasta unidades de pH 0,05. Estandarícese y equilíbrense con arreglo a las instrucciones del fabricante. Debe prestarse una especial atención a la compensación de la temperatura y al cuidado del electrodo. Si la temperatura no se compensa de forma automática, titúlese a 25 ± 5 °C.

- ***Vaso de titulación***

Su tamaño y forma dependerán de los electrodos y del tamaño de la muestra. El espacio que queda libre sobre la muestra debe ser lo más reducido posible, dejando sitio para el reactivo y la inmersión completa de la porción indicadora de los electrodos. Para electrodos de tamaño convencional, llénese un vaso Berzelius sin ranuras, de tipo alto y con una capacidad de 200 ml. Colóquese un tapón con tres orificios, para ajustar los dos electrodos y la bureta. Con un electrodo miniatura de combinación vidrio-referencia, empléese un erlenmeyer de 125 ó 250 ml con un tapón de dos orificios.

- ***Agitador magnético.***

- ***Pipetas volumétricas.***

- ***Matraces volumétricos, 1.000, 200 y 100 ml.***

- ***Buretas, cristal borosilicato, 50, 25, y 10 ml.***

- ***Botella de poliolefina, 1 l.***

Reactivos:

- **Solución de carbonato sódico, aproximadamente 0,05N**

Séquense entre 3 y 5 g de carbonato sódico (Na_2CO_3) estándar primario a 250 °C durante 4 horas y enfríese en desecador. Se pesan 2,5 +- 0,2 g (miligrámicos) y se transfieren a un matraz volumétrico de 1 l, llenando hasta la marca con agua destilada y mezclando el reactivo. No debe conservarse más de una semana.

- **Ácidos sulfúrico o clorhídrico estándar, 0,1N**

Prepárese la solución ácida 0,1N, estandarícese frente a una solución de 40 ml de carbonato sódico (Na_2CO_3) 0,05N en probeta, con unos 60 ml de agua, titulando potenciométricamente a un pH aproximado de 5. Elévense los electrodos, enjuáguese en la misma probeta y háganse hervir suavemente durante 3-5 min cubriendo con un vidrio de reloj. Enfríese a temperatura ambiente, enjuáguese el cristal en la probeta y conclúyase la operación titulando en el punto de inflexión de pH. Calcúlese la normalidad.

$$\text{Normalidad, } N = \frac{AB}{53,00C}$$

Donde:

A = g de Na_2CO_3 , pesados en el matraz de 1 l,

B = ml de solución de Na_2CO_3 tomados para titulación, y

C = ml de ácido empleados.

Utilícese la normalidad medida en los cálculos o ajústese a 0,1000N; 1 ml de solución 0,1000N = 5,0 mg de CaCO_3 .

- **Ácidos sulfúrico o clorhídrico estándar, 0,02N**

Dilúyase 200,0 ml de ácido estándar 0,1000N hasta 1.000 ml de agua destilada o desionizada. Estandarícese mediante titulación potenciométrica de 15 ml de Na_2CO_3 0,05N, de acuerdo con el procedimiento del apartado anterior (*Ácidos sulfúrico o clorhídrico estándar, 0,1N*). 1 ml = 1,0 mg de CaCO_3 .

- **Solución indicadora de verde de bromocresol, indicador de pH 4,5**

Disuélvase 100 mg de púrpura de verde de bromocresol, sal sódica, en 100 mg de agua destilada.

- **Solución indicadora de púrpura de metacresol, indicador de pH 8,3**

Disuélvase 100 mg de púrpura de metacresol en 100 ml de agua.

- **Solución alcohólica de fenolftaleína, indicada a pH 8,3.**

- **Tiosulfato sódico, 0,1N**

Dilúyase 25 g de $\text{NaS}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y disuélvase hasta 1.000 ml en agua destilada.

Procedimiento:

- **Curva de titulación potenciométrica**

- 1) Los electrodos y el vaso de titulación se enjuagan con agua destilada y se drenan. Selecciónese el tamaño de la muestra y la normalidad del reactivo. Si es necesario, ajústese la muestra a la temperatura ambiente y, con pipeta, viértase la muestra en un matraz, manteniendo la punta cerca del fondo de este.
- 2) Mídase el pH de la muestra. Añádase 0.2 ml (5 gotas) de solución indicadora y titúlese añadiendo ácido estándar en incrementos de 0.5 ml o menos, de forma que se produzca con cada incremento un cambio de menos de 0,2 unidades de pH, realícese esto sobre una superficie blanca hasta conseguir un cambio de color persistente, característico del punto equivalente.

Cálculos:

- **Titulación potenciométrica a pH de punto final**

Alcalinidad, mg CaCO₃/l = (A x N x 50.000)/ muestra ml

Donde:

A = ml utilizados de ácido estándar, y

N = normalidad del ácido estándar.

Nota : para éste estudio en particular se consideró que la alcalinidad total e igual a la concentración de iones bicarbonato (HCO₃⁻), ya que el pH medido de las aguas analizadas no fue mayor a 8 (Ref.4).

1.9 Metodología para la determinación del pH. (Ref.1)

Nombre del método: 4500-H⁺ VALOR DE pH.

Número del método: 4500-H⁺ B.

Procedimiento: Método electrométrico 4500-H⁺ B.

Instrumental:

- **Medidor de pH**

Utilícese un medidor de pH que conste de un potenciómetro, un electrodo de vidrio, un electrodo de referencia, y un dispositivo para compensar la temperatura.

Para trabajos de rutina utilícese un medidor de pH exacto y reproducible hasta 0,1 unidades de pH con una escala de 0 a 14.

Reactivos:

- **Preparación general**

Calíbrese el sistema de electrodos frente a soluciones tampón estándar o con pH conocido; entre los reactivos utilizados como patrones primarios están:

- 1) Tartrato ácido de potasio (saturado a 25 °C) posee un pH de 3,557.
- 2) Citrato diácido de potasio 0,05 molal posee un pH de 3,776 a 25 °C.

Procedimiento:

- **Análisis de la muestra**

Establézcase el equilibrio entre electrodos y muestra agitando esta para asegurar su homogeneidad; la agitación será suave para reducir al mínimo el arrastre de dióxido de carbono y léase el pH.

1.10 Metodología para la determinación de la temperatura. (Ref.1)

Nombre del método: 2550 TEMPERATURA.

Número del método: 2550 B.

Procedimiento: Métodos de laboratorio y de campo 2550 B.

Instrumental y procedimiento:

Normalmente, las medidas de temperatura pueden realizarse con cualquier termómetro Celsius de mercurio, que, como mínimo, deberá tener una escala con marcas cada 0,1 °C sobre el tubo capilar y una capacidad térmica mínima que permita un equilibrado rápido.

Compruébese periódicamente con un termómetro de precisión certificado por el National Institute of Standards and Technology (NIST, antes National Bureau of Standards), que se utiliza con su certificado y cédula de corrección. Para operaciones de campo, utilícese un termómetro con estuche metálico a fin de evitar roturas.

1.11 Metodología para la determinación de magnesio (Mg^{+2}) (Ref.1)

Nombre del método: 3500-Mg MAGNESIO.

Número del método: 3500-Mg E.

Procedimiento: Método de cálculo 3500-Mg E.

Cálculos:

El magnesio puede calcularse como diferencia entre la dureza y el calcio, como $CaCO_3$, si los metales que interfieren están presentes en concentraciones no interfirientes en la titulación del calcio es decir: cobre (Cu^{+2}) 2 mg/l, hierro (Fe^{+2}) 20 mg/l, hierro (Fe^{+3}) 20 mg/l, manganeso (Mn^{+2}) 10 mg/l, zinc (Zn^{+2}) 5 mg/l, plomo (Pb^{+2}) 5 mg/l, aluminio (Al^{+3}) 5 mg/l y estaño (Sn^{+4}) 5 mg/l. Y si se utilizan inhibidores adecuados en la titulación de la dureza como por ejemplo la sal magnésica del ácido 1, 2-ciclohexanodiaminotetraacético.

$mg\ Mg/l = [dureza\ total\ (como\ mg\ CaCO_3/l) - dureza\ de\ calico\ (como\ mg\ CaCO_3/l)] \times 0,243.$

2. RESULTADOS

2.1 Durezas Totales e Índices de Langelier en el área metropolitana de Guatemala por zonas geográficas.

Tabla III. Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noroeste del área metropolitana de Guatemala.

(Ver Fig. 7, Apéndice 3).

No. de pozo	Época de estío		Época lluviosa	
	Dureza Total mg/l CaCO ₃	Índice de Langelier	Dureza Total mg/l CaCO ₃	Índice de Langelier
1	72	-1,629103607	142	-1,37816234
2	72	-1,039319355	130	-0,99655288
3	60	-1,148614966	82	-1,287417103
4	28	-0,983437043	54	-1,222350972
Promedio	58	-1,20011874	102	-1,22112082

Tabla IV. Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noreste del área metropolitana de Guatemala.

(Ver Fig. 8, Apéndice 3).

No. De pozo	Época de estío		Época lluviosa	
	Dureza Total mg/l CaCO ₃	Índice de Langelier	Dureza Total Mg/l CaCO ₃	Índice de Langelier
5	204	-1,209744268	200	-1,118750697
6	170	-1,465350092	190	-1,117935244
7	124	-1,544655695	148	-1,105604072
8	144	-1,689515096	152	-1,363161424
9	92	-0,040116702	94	-0,752530458
10	50	-1,572316902	56	-1,828503877
11	48	-1,625293815	48	-1,788213155
12	60	-1,40800958	90	-1,67849737
13	46	-1,465955512	66	-1,679539023
14	64	-1,424124495	70	-1,468308279
15	60	-1,8590732	76	-1,641421822
16	168	0,208031759	168	-0,073401077
17	88	-0,878466082	72	-0,7535419
18	154	-0,285181684	158	-0,286416651

**Tabla V. Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noreste del área metropolitana de Guatemala. (Continuación)
(Ver Fig. 8, Apéndice 3).**

No. de pozo	Época de estío		Época lluviosa	
	Dureza Total mg/l CaCO ₃	Índice de Langelier	Dureza Total mg/l CaCO ₃	Índice de Langelier
19	210	0,150060882	192	0,176331862
20	170	-0,027148147	200	0,042540077
21	248	0,171559153	200	0,115162173
22	256	-1,061687885	198	0,018946857
23	188	0,022880507	180	-0,391435213
24	212	-0,362937627	210	0,097044155
25	200	-0,225780936	200	0,078394407
26	214	-0,085564343	220	0,102413021
27	188	0,258747573	186	0,044923986
28	200	0,069997353	194	0,209545635
29	224	0,105131876	214	0,028432595
30	228	0,193854114	226	0,17904235
31	184	0,09304197	172	0,115804271
32	224	0,125942263	280	0,032691619

**Tabla VI. Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noreste del área metropolitana de Guatemala. (Continuación)
(Ver Fig. 8, Apéndice 3).**

No. de pozo	Época de estío		Época lluviosa	
	Dureza Total mg/l CaCO ₃	Índice de Langelier	Dureza Total mg/l CaCO ₃	Índice de Langelier
33	200	0,014695647	232	-0,068144352
34	110	-0,617742686	128	-0,505984068
35	214	-0,21682294	236	0,188768741
36	200	-0,210185919	122	-0,124474932
37	174	-0,179959983	178	0,105557793
38	200	0,03952749	216	0,056925956
Promedio	162,235294	-0,52947538	163,882353	-0,47509818

Tabla VII. Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el suroeste del área metropolitana de Guatemala.

(Ver Fig. 9, Apéndice 3).

No. De pozo	Época de estío		Época lluviosa	
	Dureza Total mg/l CaCO₃	Índice de Langelier	Dureza Total mg/l CaCO₃	Índice de Langelier
39	82	-1,089065878	90	-0,97931099
40	116	-1,166304449	129	-1,024194878
41	68	-1,242019183	128	-1,260901012
42	100	-1,336149658	138	-0,941972834
Promedio	91,5	-1,20838479	121,25	-1,05159493

Tabla VIII. Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea, en el sureste del área metropolitana de Guatemala.

(Ver Fig. 10, Apéndice 3).

No. de pozo	Época de estío		Época lluviosa	
	Dureza Total mg/l CaCO ₃	Índice de Langelier	Dureza Total mg/l CaCO ₃	Índice de Langelier
43	80	-1,471538844	98	-1,322994305
44	96	-1,416954813	122	-0,655851905
45	70	-0,627458199	138	-1,720171062
46	68	-0,668843892	122	-0,950504177
47	60	-1,67896549	88	-1,310704079
48	66	-1,624216359	90	-1,497561186
49	46	-2,357798155	88	-1,286343513
Promedio	69,4285714	-1,40653939	106,571429	-1,24916146

Figura 1. Índice de Langelier por zonas geográficas en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época de estío.

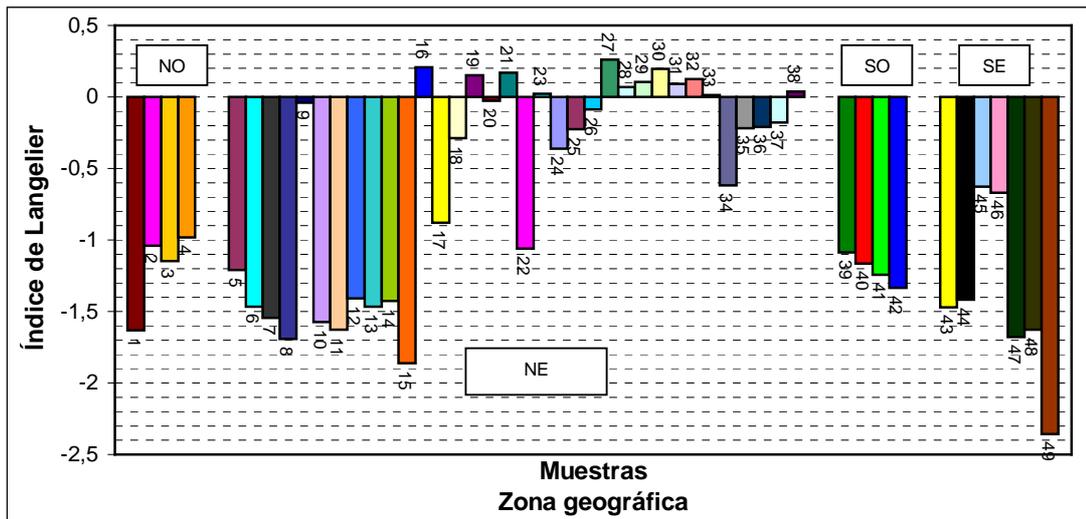


Figura 2. Índice de Langelier por zonas geográficas en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época lluviosa.

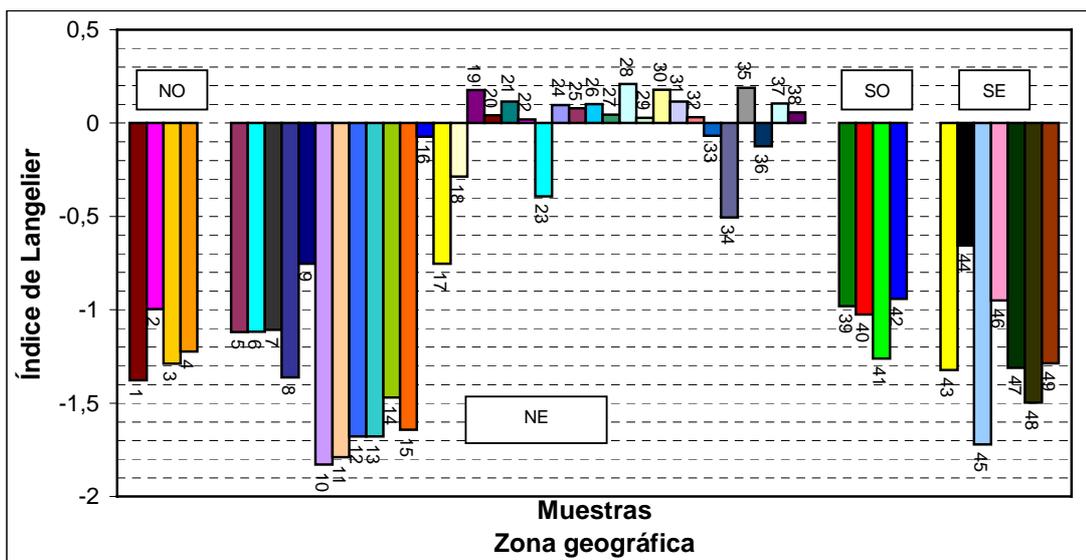


Figura 3. Dureza Total del agua subterránea por zonas geográficas en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época de estío.

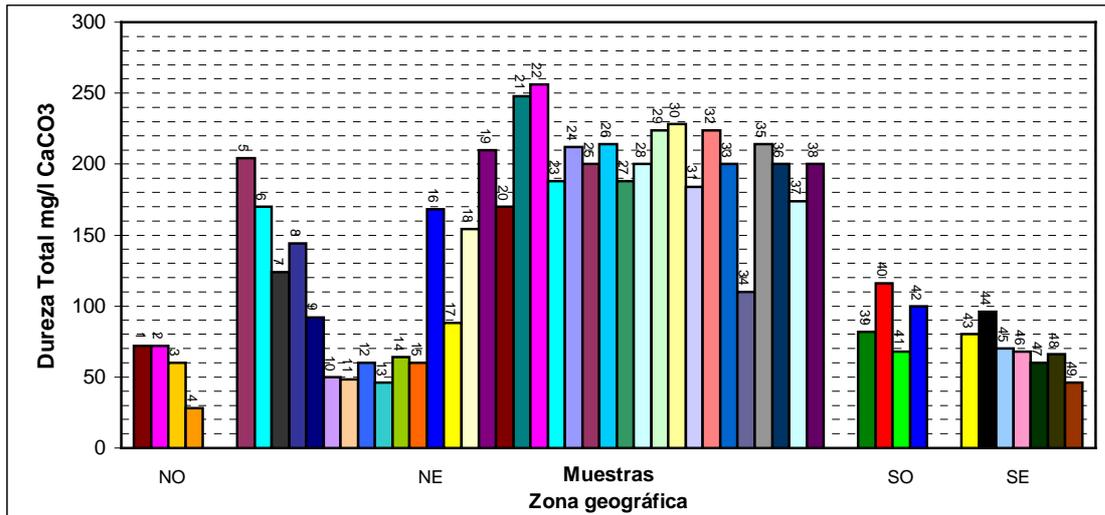


Figura 4. Dureza total del agua subterránea por zonas geográficas en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época lluviosa.

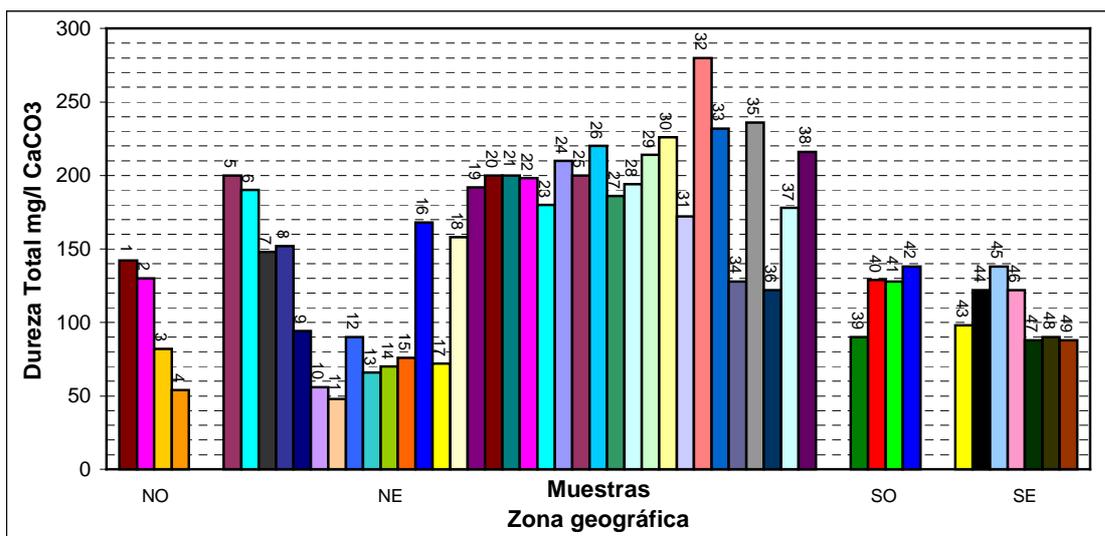


Figura 5. Índices de Langelier del agua de cada pozo en función del pH medido en el área metropolitana de Guatemala en época de estío.

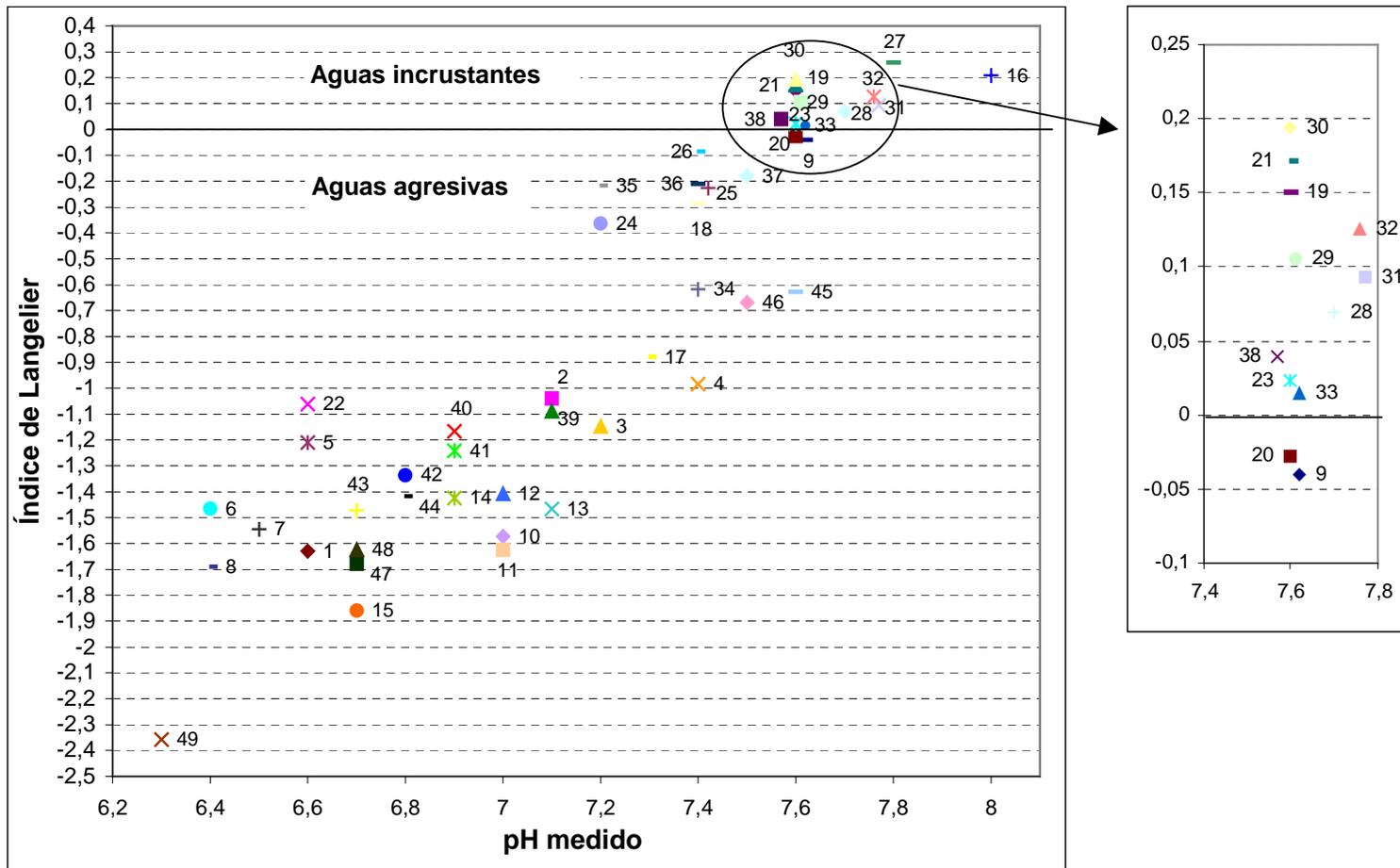
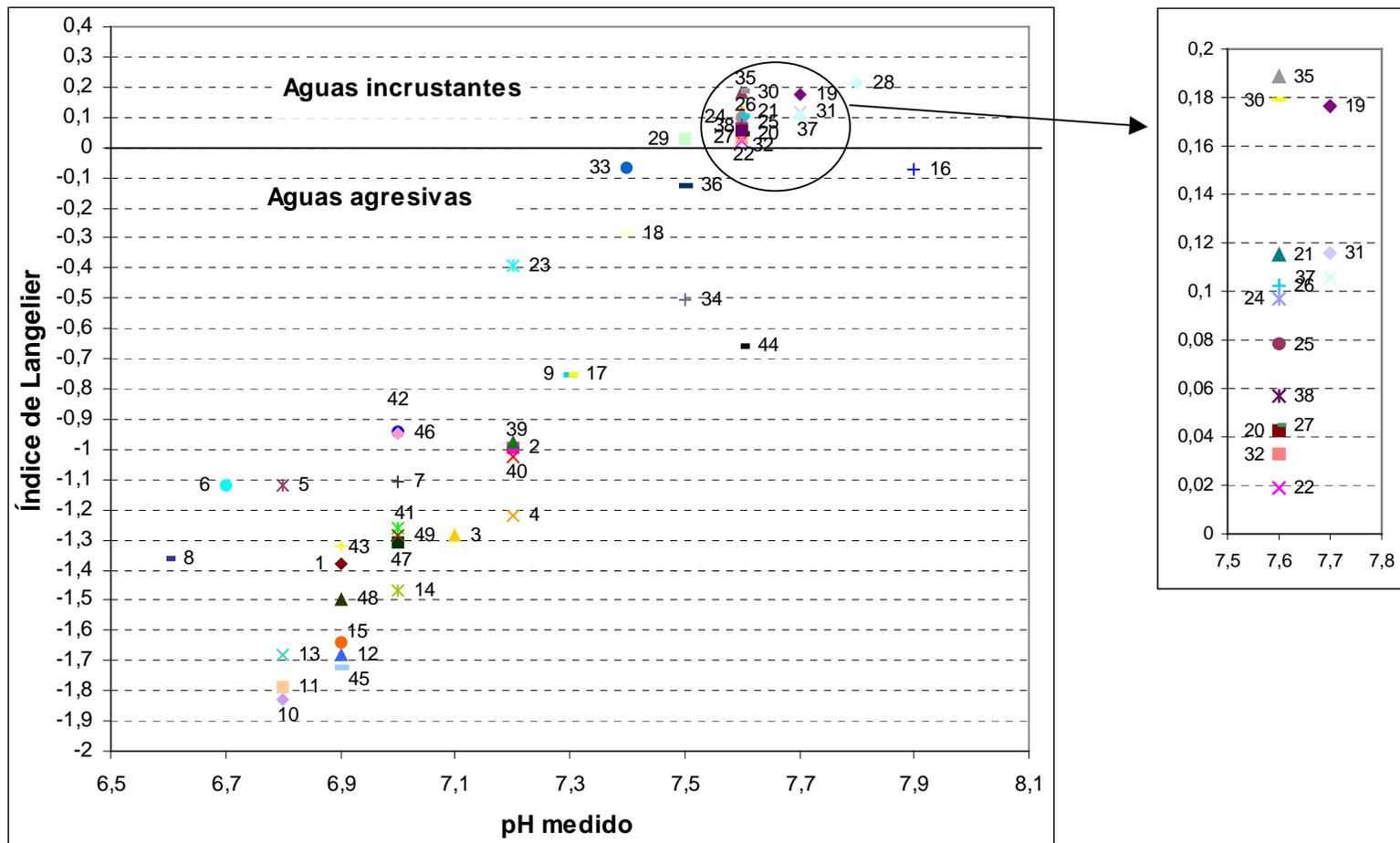


Figura 6. Índices de Langelier del agua de cada pozo en función del pH medido en el área metropolitana de Guatemala en época lluviosa.



2.2 Resultados estadísticos de Durezas Totales e Índices de Langelier en el área metropolitana de Guatemala por zonas geográficas .

Tabla IX. Medidas de tendencia central y de dispersión de la Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noroeste del área metropolitana de Guatemala.

Parámetros y épocas del año	Media Muestral (M)	Mediana (Mdn)	Varianza (s²)	Desviación Estándar (s)	Desviación Media (D.m.)
Dureza Total en época de estío	58 (mg/l)	66 (mg/l)	432 (mg ² /l ²)	20,78461 (mg/l)	6 (mg/l)
Índice de Langelier en época de estío	-1,20012	-1,09397	0,086496	0,294102	0,082589
Dureza Total En época lluviosa	102 (mg/l)	106 (mg/l)	1696 (mg ² /l ²)	41,18252 (mg/l)	30 (mg/l)
Índice de Langelier En época lluviosa	-1,22112	-1,25488	0,026497	0,162777	0,077906

Fuente: Sección de Resultados, Tabla III y Figuras 1, 2, 3 y 4.

Tabla X. Medidas de tendencia central y de dispersión de la Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el noreste del área metropolitana de Guatemala.

Parámetros y épocas del año	Media Muestral (M)	Mediana (Mdn)	Varianza (s²)	Desviación Estándar (s)	Desviación Media (D.m.)
Dureza Total en época de estío	162,2353 (mg/l)	186 (mg/l)	4058,61 (mg ² /l ²)	63,70722 (mg/l)	30 (mg/l)
Índice de Langelier en época de estío	-0,52948	-0,2135	0,514221	0,717092	0,374314
Dureza Total En época lluviosa	163,8824 (mg/l)	183 (mg/l)	3664,228 (mg ² /l ²)	60,53287 (mg/l)	32 (mg/l)
Índice de Langelier En época lluviosa	-0,4751	-0,07077	0,509208	0,713588	0,24846

Fuente: Sección de Resultados, Tablas IV, V, VI y Figuras 1, 2, 3 y 4.

Tabla XI. Medidas de tendencia central y de dispersión de la Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el suroeste del área metropolitana de Guatemala.

Parámetro y época del año	Media Muestral (M)	Mediana (Mdn)	Varianza (s²)	Desviación Estándar (s)	Desviación Media (D.m.)
Dureza Total En época de estío	91,5 (mg/l)	91 (mg/l)	438,3333 (mg ² /l ²)	20,93641 (mg/l)	16 (mg/l)
Índice de Langelier En época de estío	-1,20838	-1,20416	0,011154	0,105614	0,076477
Dureza Total En época lluviosa	121,25 (mg/l)	128,5 (mg/l)	454,25 (mg ² /l ²)	21,31314 (mg/l)	5 (mg/l)
Índice de Langelier En época lluviosa	-1,05159	-1,00175	0,020601	0,143529	0,041111

Fuente: Sección de Resultados, Tabla VII y Figuras 1, 2, 3, y 4.

Tabla XII. Medidas de tendencia central y de dispersión de la Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en el sureste del área metropolitana de Guatemala.

Parámetro y época del año	Media Muestral (M)	Mediana (Mdn)	Varianza (s²)	Desviación Estándar (s)	Desviación Media (D.m.)
Dureza Total en época de estío	69,42857 (mg/l)	68 (mg/l)	244,9524 (mg ² /l ²)	15,65095 (mg/l)	8 (mg/l)
Índice de Langelier en época de estío	-1,40654	-1,47154	0,363665	0,603046	0,207427
Dureza Total en época lluviosa	106,5714 (mg/l)	98 (mg/l)	416,9524 (mg ² /l ²)	20,41941 (mg/l)	10 (mg/l)
Índice de Langelier en época lluviosa	-1,24916	-1,3107	0,122564	0,350092	0,186857

Fuente: Sección de Resultados, Tabla VIII y Figuras 1, 2, 3 y 4.

Tabla XIII. Medidas de tendencia central y de dispersión de la Dureza Total e Índice de Langelier del agua subterránea en todas las muestras analizadas (49) del área metropolitana de Guatemala.

Parámetro y época del año	Media Muestral (M)	Mediana (Mdn)	Varianza (s²)	Desviación Estándar (s)	Desviación Media (D.m.)
Dureza Total en época de estío	134,6939 (mg/l)	124 (mg/l)	4679,425 (mg ² /l ²)	68,40632 (mg/l)	64 (mg/l)
Índice de Langelier en época de estío	-0,76494	-0,87847	0,536562	0,732504	0,66828
Dureza Total en época lluviosa	147,1633 (mg/l)	142 (mg/l)	3369,889 (mg ² /l ²)	58,05075 (mg/l)	52 (mg/l)
Índice de Langelier en época lluviosa	-0,69364	-0,75354	0,481044	0,693573	0,685398

Fuente: Sección de Resultados, Tablas de la I a la VIII y Figuras de 1a 4.

Donde:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (12)$$

$$Mdn = x_{(n+1)/2} \text{ si } n \text{ es impar} \quad (13)$$

$$Mdn = \frac{x_{n/2} + x_{(n/2)+1}}{2} \text{ si } n \text{ es par} \quad (14)$$

$$D.m. = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - M| \quad (15)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M)^2}{n-1} \quad (16)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M)^2}{n-1}} \quad (17)$$

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Discusión acerca de la Dureza Total y la agresividad en el noroeste del área metropolitana de Guatemala.

En los cuatro muestreos y análisis realizados en los pozos ubicados en el noroeste del área metropolitana (véase Fig.7, Ap.3) en la época de estío, el agua resultó ser moderadamente dura según la clasificación industrial (ver tabla II), dando una media de dureza de 58 mg/l; a excepción del pozo No.4 cuyo análisis muestra que el agua es blanda (28mg/l). En la época lluviosa el agua de las cuatro muestras fue también moderadamente dura, dando una media de dureza de 102 mg/l. Además, los valores de durezas están más cercanos a la media en la época de estío (son más homogéneos) como lo indica un menor valor en la desviación estándar (s) siendo éste de 20,78461 (estío) y 41,18252 (época lluviosa) (ver tabla IX). Como puede observarse, existe un aumento significativo en la Dureza Total de todas las muestras de la época de estío a la época de lluvia siendo ésta en promedio de 58 mg/l y 102 mg/l respectivamente, esto se debe principalmente a que el agua de lluvia disuelve minerales carbonatados como rocas calizas antes de llegar a los acuíferos, realizándose una lixiviación que conlleva el aumento de los iones de calcio y magnesio presentes en el agua subterránea(Ref.2). Respecto al Índice de Saturación de Langelier, éste muestra que el agua de esta zona es corrosiva en las cuatro muestras y en las dos épocas del año, siendo en promedio -1,20011874 (estío), y -1,22112082 (lluvia) (ver tablas II y IX), lo cual es apoyado por los valores de las desviaciones estándar que son muy cercanas a cero 0,294102 (estío) y 0,162777 (lluvia).

3.2 Discusión acerca de la Dureza Total y la agresividad en el noreste del área metropolitana de Guatemala.

En el noreste del área metropolitana (véase Fig.8, Ap.3) se realizaron 34 muestreos, los cuales arrojaron resultados muy variados, mostrándose ésta como la zona con los mayores valores de Dureza Total encontrados tanto en la época de estío como en la época lluviosa. El agua varía desde agua blanda hasta agua dura, encontrándose la menor Dureza Total en el agua del pozo No.13 (46mg/l) “agua blanda”, y la mayor en el agua del pozo No.22 (256mg/l) “agua dura” (ver fig.3) en la época de estío, siendo en promedio de 162,24 mg/l. Sin embargo, en la época de lluvia la menor Dureza Total fue encontrada en el agua del pozo No.11 (48mg/l) “Agua blanda” y la mayor en el pozo No.32 (280mg/l) “agua dura” (ver fig.4), el promedio fue de 163,88 mg/l. Con relación a la agresividad, los pozos del número 5 al 9 y del 10 al 15 dieron como resultado agua corrosiva en las dos épocas del año (ver fig.1 y 2), ya que poseen índices de saturación menores a -1 (ver tabla II). Aunque tanto los resultados de dureza total como de agresividad son muy heterogéneos en esta zona de la ciudad como lo indican los valores altos en las desviaciones estándar (ver tabla X) puede decirse que respecto a la época del año estos no cambian significativamente ya que tanto las medidas de tendencia central como las de dispersión varían muy poco en relación a la época del año (ver tabla X).

Se encontraron áreas en las que el Índice de Langelier es casi cero lo que significa que el agua está muy cercana al equilibrio carbónico (ver fig. 1 y 2); de los 34 muestreos realizados en ésta zona solamente 11 son ligeramente incrustantes ya que su índice de Langelier está entre 0 y 0.5 (ver tabla II), lo cual equivale al 22% de la totalidad de las muestras analizadas, en ésta zona se pudiera presentar una tendencia a la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3), esto es consistente con los valores de pH, pues son las zonas que presentaron los valores más altos de este parámetro fisicoquímico (ver tablas XIX y XX). Los promedios en el Índice de Langelier son de -0,5294753 y -0,4750981 estío y lluvia respectivamente. Se observa una relación importante entre la agresividad y la Dureza Total, y es que en las áreas de menor Dureza Total se registran las mayores agresividades, y viceversa, en las áreas de mayor Dureza Total se tienen las menores agresividades, lo cual es congruente con la teoría, aunque no es así en todos los casos, debido principalmente a la influencia de los iones ajenos al sistema carbonato.

3.3 Discusión acerca de la Dureza Total y la agresividad en el suroeste del área metropolitana de Guatemala.

En el suroeste del área metropolitana (véase Fig.9,Ap.3) se realizaron cuatro análisis en los que el agua resultó ser moderadamente dura en las dos épocas del año, observándose un ligero aumento en la Dureza Total de la época de estío a la época lluviosa, siendo en promedio de 91,5mg/l (estío) y 121,25mg/l (lluvia). Dando un agua de naturaleza corrosiva en ambas épocas del año, a excepción del pozo No.42 que en la época lluviosa resultó ser solo moderadamente corrosiva con un índice de Langelier de $-0,941972834$; ésta es la zona con los valores más homogéneos en agresividad en las dos épocas del año siendo su desviación estándar de 0,105614 (estío), y 0,143529 (lluvia) (ver tablas II y XI).

3.4 Discusión acerca de la Dureza Total y la agresividad en el sureste del área metropolitana de Guatemala.

En el sureste del área metropolitana (véase Fig.10,Ap.3) se estudiaron 7 muestras, en todas ellas se obtuvo agua moderadamente dura en las dos épocas del año, encontrando en promedio 69,4mg/l (estío) y 106,57mg/l (lluvia), a excepción del pozo No.49 que en la época de estío contenía agua blanda (46mg/l), ésta misma muestra presentó la mayor agresividad encontrada en todos los análisis dando un Índice de Langelier de -2.357798155, de manera que resultó ser muy corrosiva lo que confirma la relación inversa entre Dureza Total y agresividad. En el resto de las muestras el agua varía de moderadamente corrosiva a corrosiva; en promedio se obtuvo un Índice de Langelier de -1,40653939 (estío) y -1,24916146 (lluvia)(Ver tabla II y XII).

CONCLUSIONES

1. En el 92% de las muestras analizadas (45 muestras) se observó una relación inversa entre la Dureza Total y la agresividad, ya que las zonas que muestran mayor Dureza Total, muestran también los valores más bajos en agresividad, y viceversa.
2. El agua subterránea en los pozos número 10 al 15 (noreste) y 45 al 49 (sureste) del área metropolitana de Guatemala posee los mayores valores de agresividad, ya que el Índice de Langelier es menor a -1 así como también los menores valores de Dureza Total que están entre 50 mg/l y 150 mg/l como Carbonato de Calcio.
3. La Tendencia del agua subterránea en el área metropolitana de Guatemala es corrosiva, ya que el 78% de las muestras (38) en la época de estío y el 67% (33) en la época lluviosa resultaron ser agresivas y únicamente 22% (11) en la época de estío y 33% (16) en la época lluviosa muestran agua ligeramente incrustante.
4. Tanto los valores de Dureza Total como de agresividad del agua subterránea en el área metropolitana de Guatemala no cambian significativamente de la época de estío a la época lluviosa, ya que sus medidas de tendencia central y de dispersión varían muy poco respecto a la época del año.

RECOMENDACIONES

1. El enfoque que debe hacerse en el tratamiento del agua subterránea en el área metropolitana de Guatemala debe estar en función de los requerimientos de calidad del agua en cada tipo de industria.
2. Deberá recalcularse tanto la Dureza Total como el Índice de Langelier en aquellas industrias donde el agua se utilice a temperaturas que difieran en más de 5 °C de la temperatura de 24 °C utilizada en los análisis debido a que la posición de todos los equilibrios químicos involucrados es una función de la temperatura.
3. La zona corrosiva incluye los pozos del 1 al 18 y del 38 al 49 (ver Fig.7 a 10,Ap.3), en la cual será necesario un tratamiento químico anticorrosivo con objeto de disminuir la agresividad del agua, y así prevenir problemas de corrosión.
4. La zona ligeramente incrustante incluye los pozos del número 19 al 38 del noreste del área metropolitana de Guatemala (ver Fig.8,Ap.3), en la cual será necesario tratar el agua con objeto de disminuir la Dureza Total y así prevenir problemas de incrustación.
5. El Índice de Langelier puede también ser utilizado como un indicador macro de contaminación, ya que éste incluye las concentraciones de los iones ajenos al sistema de carbonatos; en general, el Índice es más negativo a medida que aumentan las concentraciones de iones ajenos.

REFERENCIAS

1. Clesceri, Lenore. Apha-Awwa-Wpcf. **Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales**. Ediciones Diaz de Santos, S.A.
2. Icela D. Barceló Quintal y otros, "Determinación del estado de equilibrio de un sistema hídrico" **Revista de la Sociedad Química de México** (México) (46):23-40. 2002.
3. Sorrell, Charles, **Rocks and Minerals**. A guide to field Identification. Golden Press, New York,1973. pp.10-15.
4. Vernon Snoeyink y David Jenkins. **Química del agua**. México: Limusa, 1997.pp.316-330.
5. Víctor Ernesto Cordón Orellana, Determinación de la dureza total del agua y del índice de Lagelier del agua para uso industrial de los pozos de la Empresa Municipal de Agua ubicados en la Ciudad de Guatemala. Tesis Ing. Quím. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1996.pp.15-30.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. Normas APA sobre material numérico, estadístico y matemático (2001)

<http://www.um.es/analesps/apaestad/index.html>

2. Clasificación del Índice de Langelier para uso industrial

<http://www.water-research.net/corrosion.htm>.

BIBLIOGRAFÍA

1. Barceló Quintal, Icela D. y otros. "Determinación del estado de equilibrio de un sistema hídrico" **Revista de la Sociedad Química de México** (México) (46):93.2002.
2. Clesceri, Lenore. Apha-Awwa-Wpcf. **Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales**. Ediciones Diaz de Santos, S.A.
3. Cordón Orellana, Víctor Ernesto Determinación de la dureza total del agua y del índice de Lagelier del agua para uso industrial de los pozos de la Empresa Municipal de Agua ubicados en la Ciudad de Guatemala. Tesis Ing. Quím. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1996. 37pp.
4. Christian, Gary D. **Química Analítica** 2ª Edición, México: Editorial Limusa, 1981 685pp.
5. Herro, Harvey M. y Robert D. Port. **Guía Nalco para el análisis de fallas en los sistemas de enfriamiento por agua**. México: McGraw-Hill, 1995. 420pp.
6. Lane, Russell W. **Control de incrustaciones y corrosión en instalaciones hidráulicas de edificios**. México: McGraw-Hill, 1995. 277pp.
7. Pietrzyk, Donald J. Clyde W. Frank. **Química analítica**. 1ª edición en español traducida de la 2ª en inglés, México, Nueva Editorial Interamericana, 1983. 321pp.

8. Schmelkes, Corina. **Instructivo para el protocolo de trabajos de graduación.** Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2000. 29pp.

9. Snoeyink, Vernon y David Jenkins. **Química del agua.** México: Limusa, 1997. 508pp.

10. Walpole, Ronald. **Probabilidad y Estadística** 6a ed. México: McGraw-Hill 1998. pp 198-207.

APÉNDICE 1

DATOS ORIGINALES

Tabla XIV. Concentraciones catiónicas del agua del área metropolitana de Guatemala en cada pozo en época de estío y época lluviosa (mg/l).

No. Pozo	Ca ⁺²		Mg ⁺²		Na ⁺		K ⁺	
	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia
1	16,03	16,83	7,79	24,37	11,7	14,1	1,6	1,6
2	16,03	16,83	7,79	21,44	18,7	21,4	2,8	2,7
3	11,22	12,02	7,79	12,63	18,9	15,8	2	1,7
4	6,41	8,02	2,92	8,26	31,4	24,8	2,9	2,9
5	45,69	46,49	21,9	20,43	13,2	13,4	3,3	2,7
6	40,88	38,48	16,54	22,88	22	29,2	4,1	2,7
7	31,26	27,25	11,18	19,48	9,8	13,3	4	2,9
8	34,47	35,27	14,1	15,57	9,7	15,6	4,8	4,6
9	32,25	28,05	2,77	5,82	39	41	2,1	2,3
10	12,02	11,22	4,87	8,74	7,2	6	2,1	1,8
11	10,42	12,02	5,35	4,37	7,7	6	1,6	1,6
12	12,82	11,22	6,82	15,06	11,7	6,6	1,7	1,1
13	12,02	15,23	3,89	6,79	8,2	6,4	1,6	1,6
14	13,63	12,02	7,3	9,71	16,5	13,2	2,2	2
15	12,82	12,83	6,82	10,71	9	7,3	1,7	1,7
16	32,96	20,84	20,88	28,27	18,3	17,5	1,7	1,8
17	20,04	10,44	9,24	11,04	13,8	13	0,9	1
18	40,08	44,89	13,12	23,59	20,2	21	1,5	1,3
19	62,1	53,71	13,35	13,92	9,2	8,2	2,4	2,5
20	49,29	53,52	11,41	15,95	11,8	9,9	2,4	2,4
21	62,12	58,52	22,61	12,95	10,3	9,3	2,5	2,7
22	60,92	49,69	25,29	17,95	18,4	18	4,7	4,1
23	50,5	49,7	15,6	13,44	10,4	9,7	2,1	2,3
24	40,88	44,08	26,78	24,27	18,4	13,5	1,5	1,2

Tabla XV. Concentraciones catiónicas del agua del área metropolitana de Guatemala en cada pozo en época de estío y época lluviosa (mg/l). (Continuación).

No. Pozo	Ca ⁺²		Mg ⁺²		Na ⁺		K ⁺	
	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia
25	40,08	54,51	24,34	15,54	9,4	7,5	2,1	2,2
26	55,31	55,31	18,47	19,93	9	7,2	1,4	2,2
27	50,5	50,5	15,06	14,4	11,2	9,6	2,1	2,3
28	42,29	50,5	22,99	16,32	9,6	8	1,4	2,4
29	53,71	56,11	21,88	17,98	9,5	7,1	2,1	1,8
30	59,32	60,16	19,44	18,46	10,1	6,9	1,9	2,3
31	37,67	48,1	21,91	12,62	16	12,7	1,6	1,7
32	35,27	46,49	33,13	39,94	10,2	7,1	2,2	1,8
33	41,68	60,92	23,36	19,41	9,8	6,5	2,3	2
34	24,05	24,84	12,16	16,07	12,8	10,6	2,8	2,9
35	48,1	58,52	22,87	33,97	14,1	9,7	2,8	2
36	45,49	40,88	21,04	4,83	11,7	9,6	2,2	2,1
37	37,6	48,1	19,47	14,07	10,4	7,1	1,9	1,5
38	45,69	48,9	20,92	22,87	10,2	6,7	2,1	1,7
39	18,44	20,05	8,76	9,73	14	10	0,9	0,6
40	24,05	20	13,63	11,67	16	12,5	1,5	1,6
41	16,83	19,24	6,32	19,49	11,6	9,4	1,6	1,2
42	24,05	32,06	9,73	14,11	14,9	11,6	1,4	1,1
43	17,64	20,04	8,76	11,68	18,7	9,3	1	0,7
44	17,64	20,04	12,66	17,54	8,8	12,7	0,8	0,8
45	14,43	12,83	8,27	25,75	14,8	10,8	1,3	0,8
46	17,64	31,26	5,83	10,67	14,9	11	2,9	1,3
47	15,23	15,23	5,35	12,18	9,4	12,4	0,9	0,8
48	15,23	13,63	6,81	13,64	13	16,8	2,6	2,1
49	11,22	14,43	4,38	12,63	6,8	20	2	2,2

Tabla XVI. Concentraciones aniónicas del agua del área metropolitana de Guatemala en cada pozo en época de estío y época lluviosa (mg/l).

No. Pozo	HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ⁻²		NO ₃ ⁻	
	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia
1	116	124	7,5	18,5	1	9	6,16	5,28
2	136	142	5	10	3	3	4,84	3,3
3	114	108	6	12	2	3	2,2	1,76
4	140	126	5	12,5	4	6	1,54	1,54
5	120	112	45	43,5	20	25	2,86	90
6	130	138	34	36,5	14	9	90,2	64
7	102	106	20	19,5	10	18	46,36	12,98
8	104	110	23	26,5	13	12	98	39,6
9	194	108	10	14	12	16	4,18	5,72
10	80	76	7,5	11	1	1	3,3	2,42
11	80	80	6	12	1	1	3,3	2,42
12	100	92	5,5	8	1	0,01	2,2	1,54
13	80	80	5,5	9	2	1	2,86	2,2
14	108	106	5,5	8	2	4	1,98	1,54
15	82	84	8,5	7,5	1	1	3,08	2,64
16	196	196	6	13,5	16	22	1,1	1,1
17	118	218	8,5	10	3	2	7,48	6,6
18	184	180	15	17,5	6	12	23,76	20,9
19	230	230	10	12,5	5	4	7,48	5,72
20	188	208	12,5	13	11	8	12,01	10,12
21	250	240	12,5	15	15	19	9,9	8,14
22	150	204	40	30	25	35	98	12,98
23	200	200	12,5	11	3	6	10,34	8,8
24	260	274	8,5	12	10	16	0,44	1,98
25	224	220	10	18	4	10	6,6	5,94
26	230	230	11,5	15	3	8	5,94	4,62
27	222	216	12	10	4	3	9,46	7,2
28	220	212	8	10	4	2	8,58	7,04
29	240	252	5	14,5	1	8	6,38	4,84
30	256	246	11	14	3	8	5,28	4,18
31	212	212	9	16	15	24	0,88	0,44

Tabla XVII. Concentraciones aniónicas del agua del área metropolitana de Guatemala en cada pozo en época de estío y época lluviosa (mg/l). (Continuación)

No. Pozo	HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ⁻²		NO ₃ ⁻	
	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia	Estío	Lluvia
32	256	232	7	11	4	8	4,18	3,08
33	226	208	10	15	9	15	6,16	4,84
34	144	150	11,5	10	2	4	1,1	1,1
35	242	264	11	9	4	6	4,4	2,86
36	216	240	12	10	11	65	0,88	0,88
37	210	196	7	12	3	6	3,96	3,08
38	238	226	8,5	10,5	4	8	4,62	3,3
39	120	120	10	13	6	3	7,7	5,5
40	132	105	13	11	9	26	5,28	3
41	130	104	7	12	10	12	2,2	2,86
42	108	138	14,5	20	19	31	5,06	3,74
43	130	106	8	16,5	3	5	10,78	8,58
44	118	116	9	16,5	4	7	12,98	11
45	120	116	6	6	1	0,01	3,52	3,08
46	120	110	5	8,5	9	15	2,2	1,98
47	96	112	5,5	11,5	7	7	2,64	1,98
48	104	110	8	13,5	10	5	3,08	2,86
49	66	120	7	13	1	9	6,38	2,2

Tabla XVIII. Temperaturas (°C) y pH medidos en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época de estío y época lluviosa.

No. Pozo	Temperatura		pH	
	Época de estío	Época lluviosa	Época de estío	Época lluviosa
1	25	24,4	6,6	6,9
2	26	27	7,1	7,2
3	26,7	26	7,2	7,1

Tabla XIX. Temperaturas (°C) y pH medidos en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época de estío y época lluviosa (Continuación).

No. Pozo	Temperatura		pH	
	Época de estío	Época lluviosa	Época de estío	Época lluviosa
4	26,7	25,9	7,4	7,2
5	23	24	6,6	6,8
6	25	25	6,4	6,7
7	25	22,9	6,5	7
8	25	23,6	6,4	6,6
9	28,5	24	7,62	7,3
10	21,9	21,9	7	6,8
11	21,9	21,8	7	6,8
12	23,8	22,8	7	6,9
13	22,1	21,7	7,1	6,8
14	25,4	21,7	6,9	7
15	21	22	6,7	6,9
16	23	24	8	7,9
17	23,2	23	7,3	7,3
18	24,8	23	7,4	7,4
19	22,8	22,6	7,6	7,7
20	23	22,7	7,6	7,6
21	22,8	22,7	7,6	7,6
22	22,6	24,8	6,6	7,6
23	23,4	23,2	7,6	7,2
24	24,3	24,5	7,2	7,6
25	23,3	23,4	7,42	7,6
26	23,5	23,2	7,4	7,6
27	23,5	23,2	7,8	7,6
28	23,2	21,9	7,7	7,8
29	22,5	22,8	7,61	7,5
30	24	23,9	7,6	7,6
31	24,1	24	7,77	7,7
32	24,5	24,5	7,76	7,6
33	24,2	24	7,62	7,4
34	23,5	23	7,4	7,5

Tabla XX. Temperaturas (°C) y pH medidos en cada pozo del área metropolitana de Guatemala en época de estío y época lluviosa (Continuación).

No. Pozo	Temperatura		pH	
	Época de estío	Época Lluviosa	Época de estío	Época Lluviosa
35	28,5	24	7,2	7,6
36	23	27	7,4	7,5
37	23,8	24	7,5	7,7
38	24,7	23,8	7,57	7,6
39	24	23	7,1	7,2
40	23,2	24	6,9	7,2
41	26	24	6,9	7
42	23,7	23,5	6,8	7
43	24	23,5	6,7	6,9
44	24	21	6,8	7,6
45	26,3	23,8	7,6	6,9
46	25,4	25,5	7,5	7
47	23	23,6	6,7	7
48	24	23,2	6,7	6,9
49	23	25	6,3	7

APÉNDICE 2

DATOS CALCULADOS

Tabla XXI. Datos calculados en el agua de cada pozo del área metropolitana de Guatemala para la época de estío.

No. Pozo	A	B	μ	ϵ	Kps	Ka ₂	pHs
1	0,001521	0,000234	0,002842	0,050871	4,54988E-09	4,69733E-11	8,229104
2	0,001876	1,2E-05	0,003169	0,053579	4,41977E-09	4,81241E-11	8,139319
3	0,001854	-4,56E-05	0,002715	0,049772	4,33092E-09	4,89457E-11	8,348615
4	0,00184	-0,000304	0,002593	0,048686	4,33092E-09	4,89457E-11	8,383437
5	0,003568	0,002478	0,006468	0,074994	4,8217E-09	4,47502E-11	7,809744
6	0,003246	0,003674	0,006494	0,075137	4,54988E-09	4,69733E-11	7,86535
7	0,00201	0,002121	0,004443	0,062883	4,54988E-09	4,69733E-11	8,044656
8	0,002418	0,003614	0,005389	0,068859	4,54988E-09	4,69733E-11	8,089515
9	0,002215	0,00015	0,004726	0,064739	4,11055E-09	5,11206E-11	7,660117
10	0,000977	0,000256	0,001992	0,042909	4,97806E-09	4,35708E-11	8,572317
11	0,001046	0,000188	0,001935	0,042316	4,97806E-09	4,35708E-11	8,625294
12	0,001403	5,19E-05	0,002412	0,047034	4,71107E-09	4,5627E-11	8,40801
13	0,000898	0,000187	0,001916	0,042113	4,94926E-09	4,3783E-11	8,565956
14	0,001694	-2,24E-05	0,002687	0,049528	4,49738E-09	4,74304E-11	8,324124
15	0,001286	0,000259	0,002255	0,045544	5,10975E-09	4,26281E-11	8,559073
16	0,003582	0,000528	0,005815	0,071357	4,8217E-09	4,47502E-11	7,791968
17	0,001794	0,000354	0,003281	0,054474	4,7938E-09	4,49679E-11	8,178466
18	0,002598	0,001001	0,005573	0,069955	4,57636E-09	4,67463E-11	7,685182
19	0,00216	0,000582	0,006618	0,075799	4,84976E-09	4,45335E-11	7,449939
20	0,002096	0,000991	0,005728	0,070856	4,8217E-09	4,47502E-11	7,627148
21	0,003457	0,001138	0,007833	0,081973	4,84976E-09	4,45335E-11	7,428441
22	0,004299	0,004645	0,008684	0,085977	4,87798E-09	4,43178E-11	7,661688
23	0,002462	0,000652	0,006017	0,072508	4,76607E-09	4,51866E-11	7,577119
24	0,004247	0,000368	0,007125	0,078448	4,64323E-09	4,61834E-11	7,562938
25	0,003507	0,000519	0,006347	0,074336	4,77991E-09	4,50771E-11	7,645781
26	0,002737	0,000542	0,00665	0,075973	4,75226E-09	4,52963E-11	7,485564

Tabla XXII. Datos calculados en el agua de cada pozo del área metropolitana para la época de estío. (Continuación).

No. Pozo	A	B	μ	ϵ	Kps	Ka ₂	pHs
27	0,00244	0,000633	0,006177	0,073402	4,75226E-09	4,52963E-11	7,541252
28	0,003332	0,000486	0,006296	0,074061	4,7938E-09	4,49679E-11	7,630003
29	0,003177	0,000175	0,006823	0,076885	4,89215E-09	4,42104E-11	7,504868
30	0,002917	0,000475	0,007161	0,078634	4,68382E-09	4,58488E-11	7,406146
31	0,003596	0,000659	0,006234	0,073718	4,67025E-09	4,59601E-11	7,676958
32	0,004629	0,000315	0,007049	0,07806	4,61636E-09	4,64078E-11	7,634058
33	0,003461	0,000705	0,006474	0,075028	4,65672E-09	4,60716E-11	7,605304
34	0,002148	0,000283	0,003907	0,059175	4,75226E-09	4,52963E-11	8,017743
35	0,003548	0,000397	0,006881	0,077187	4,11055E-09	5,11206E-11	7,416823
36	0,003275	0,000705	0,006459	0,074944	4,8217E-09	4,47502E-11	7,610186
37	0,002934	0,000267	0,005642	0,070358	4,71107E-09	4,5627E-11	7,67996
38	0,00312	0,00039	0,00644	0,074845	4,58965E-09	4,66332E-11	7,530473
39	0,001775	0,000544	0,003268	0,054369	4,68382E-09	4,58488E-11	8,189066
40	0,002509	0,000686	0,004183	0,06112	4,7938E-09	4,49679E-11	8,066304
41	0,001429	0,000494	0,003022	0,052381	4,41977E-09	4,81241E-11	8,142019
42	0,002082	0,001186	0,003868	0,058897	4,72476E-09	4,55165E-11	8,13615
43	0,001951	0,000305	0,003348	0,054995	4,68382E-09	4,58488E-11	8,171539
44	0,002007	0,00066	0,003405	0,055442	4,68382E-09	4,58488E-11	8,216955
45	0,001707	4,26E-05	0,002856	0,050987	4,38147E-09	4,84746E-11	8,227458
46	0,001534	0,000279	0,002979	0,052026	4,49738E-09	4,74304E-11	8,168844
47	0,001164	0,000372	0,002447	0,04736	4,8217E-09	4,47502E-11	8,378965
48	0,001575	0,000514	0,002834	0,050798	4,68382E-09	4,58488E-11	8,324216
49	0,000897	0,000319	0,001805	0,04092	4,8217E-09	4,47502E-11	8,657798

Tabla XXIII. Datos calculados en el agua de cada pozo del área metropolitana para la época lluviosa.

No. Pozo	A	B	μ	ϵ	Kps	Ka ₂	pHs
1	0,003755	0,000959	0,004679	0,064435	4,62978E-09	4,6295E-11	8,278162
2	0,003676	0,000129	0,004497	0,063242	4,29339E-09	4,9302E-11	8,196553
3	0,00232	0,00031	0,003135	0,053303	4,41977E-09	4,8124E-11	8,387417

Tabla XXIV. Datos calculados en el agua de cada pozo del área metropolitana para la época lluviosa. (Continuación).

No. Pozo	A	B	μ	ϵ	Kps	Ka ₂	pHs
4	0,002233	0,000241	0,003001	0,052211	4,43261E-09	4,8008E-11	8,422351
5	0,003432	0,004734	0,007104	0,078341	4,68382E-09	4,5849E-11	7,918751
6	0,004255	0,002799	0,006821	0,076873	4,54988E-09	4,6973E-11	7,817935
7	0,003243	0,001563	0,004911	0,065922	4,83571E-09	4,4642E-11	8,105604
8	0,00284	0,002182	0,005282	0,068217	4,73849E-09	4,5406E-11	7,963161
9	0,002725	0,000477	0,00426	0,061651	4,68382E-09	4,5849E-11	8,05253
10	0,001395	0,000413	0,00225	0,045495	4,97806E-09	4,3571E-11	8,628504
11	0,000851	0,000457	0,001975	0,042732	4,99252E-09	4,3465E-11	8,588213
12	0,002173	0,000219	0,002836	0,050816	4,84976E-09	4,4534E-11	8,578497
13	0,001167	0,000316	0,002299	0,045964	5,00703E-09	4,336E-11	8,479539
14	0,001864	0,00023	0,002788	0,050406	5,00703E-09	4,336E-11	8,468308
15	0,001692	0,000243	0,002538	0,048191	4,96364E-09	4,3677E-11	8,541422
16	0,004524	0,001111	0,006033	0,072595	4,68382E-09	4,5849E-11	7,973401
17	0,001974	0,000371	0,003747	0,058015	4,8217E-09	4,475E-11	8,053542
18	0,003982	0,001273	0,006794	0,076735	4,8217E-09	4,475E-11	7,686417
19	0,002179	0,000624	0,006226	0,073671	4,87798E-09	4,4318E-11	7,523668
20	0,002543	0,000883	0,006364	0,074433	4,86385E-09	4,4426E-11	7,55746
21	0,002268	0,001387	0,006861	0,077086	4,86385E-09	4,4426E-11	7,484838
22	0,003465	0,002598	0,007327	0,079477	4,57636E-09	4,6746E-11	7,581053
23	0,002201	0,000688	0,005816	0,071362	4,7938E-09	4,4968E-11	7,591435
24	0,003779	0,000913	0,007269	0,079182	4,61636E-09	4,6408E-11	7,502956
25	0,002403	0,001131	0,006502	0,07518	4,76607E-09	4,5187E-11	7,521606
26	0,002911	0,000895	0,006884	0,077205	4,7938E-09	4,4968E-11	7,497587
27	0,002284	0,000485	0,005974	0,072264	4,7938E-09	4,4968E-11	7,555076
28	0,002443	0,000473	0,006044	0,072656	4,97806E-09	4,3571E-11	7,590454
29	0,002656	0,000887	0,006931	0,077452	4,84976E-09	4,4534E-11	7,471567
30	0,002719	0,000848	0,007113	0,07839	4,69743E-09	4,5738E-11	7,420958
31	0,002402	0,00139	0,006202	0,073541	4,68382E-09	4,5849E-11	7,584196
32	0,005367	0,000696	0,008031	0,082927	4,61636E-09	4,6408E-11	7,567308
33	0,002885	0,00121	0,007071	0,078172	4,68382E-09	4,5849E-11	7,468144
34	0,002559	0,00035	0,004291	0,061859	4,8217E-09	4,475E-11	8,005984
35	0,004727	0,000464	0,00839	0,084619	4,68382E-09	4,5849E-11	7,411231
36	0,001743	0,002916	0,00614	0,073199	4,29339E-09	4,9302E-11	7,624475
37	0,002145	0,000659	0,005656	0,07044	4,68382E-09	4,5849E-11	7,594442

Tabla XXV. Datos calculados en el agua de cada pozo del área metropolitana de Guatemala para la época lluviosa. (Continuación).

No. Pozo	A	B	μ	ε	Kps	Ka₂	pHs
38	0,00324	0,00069	0,006682	0,076143	4,71107E-09	4,5627E-11	7,543074
39	0,001682	0,000583	0,0033	0,054618	4,8217E-09	4,475E-11	8,179311
40	0,002295	0,001329	0,003831	0,05863	4,68382E-09	4,5849E-11	8,224195
41	0,002969	0,000857	0,004078	0,060386	4,68382E-09	4,5849E-11	8,260901
42	0,002596	0,001962	0,005115	0,067196	4,75226E-09	4,5296E-11	7,941973
43	0,001916	0,000903	0,003447	0,055762	4,75226E-09	4,5296E-11	8,222994
44	0,00281	0,00097	0,004147	0,06087	5,10975E-09	4,2628E-11	8,255852
45	0,003668	8,4E-05	0,004064	0,060291	4,71107E-09	4,5627E-11	8,620171
46	0,001984	0,000777	0,004043	0,060142	4,48436E-09	4,7545E-11	7,950504
47	0,002135	0,000546	0,003284	0,054492	4,73849E-09	4,5406E-11	8,310704
48	0,002519	0,000457	0,003413	0,055503	4,7938E-09	4,4968E-11	8,397561
49	0,002577	0,000516	0,003594	0,056877	4,54988E-09	4,6973E-11	8,286344

APÉNDICE 3
UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS POZOS MUESTREADOS

Fig.7 Mapa del noroeste del área metropolitana de Guatemala
 “Ubicación de pozos muestreados”

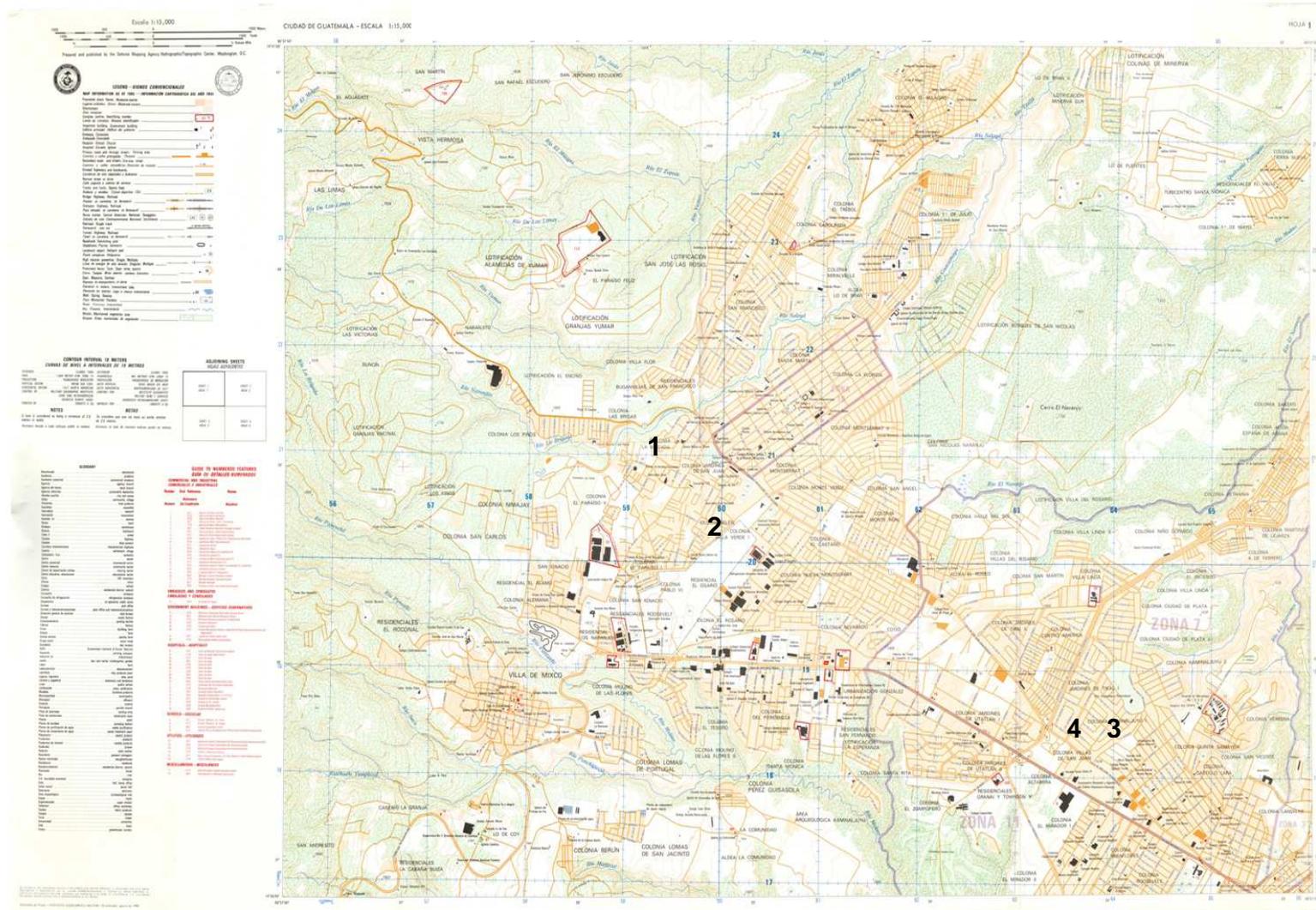


Fig.8 Mapa del noreste del área metropolitana de Guatemala
 “Ubicación de pozos muestreados”

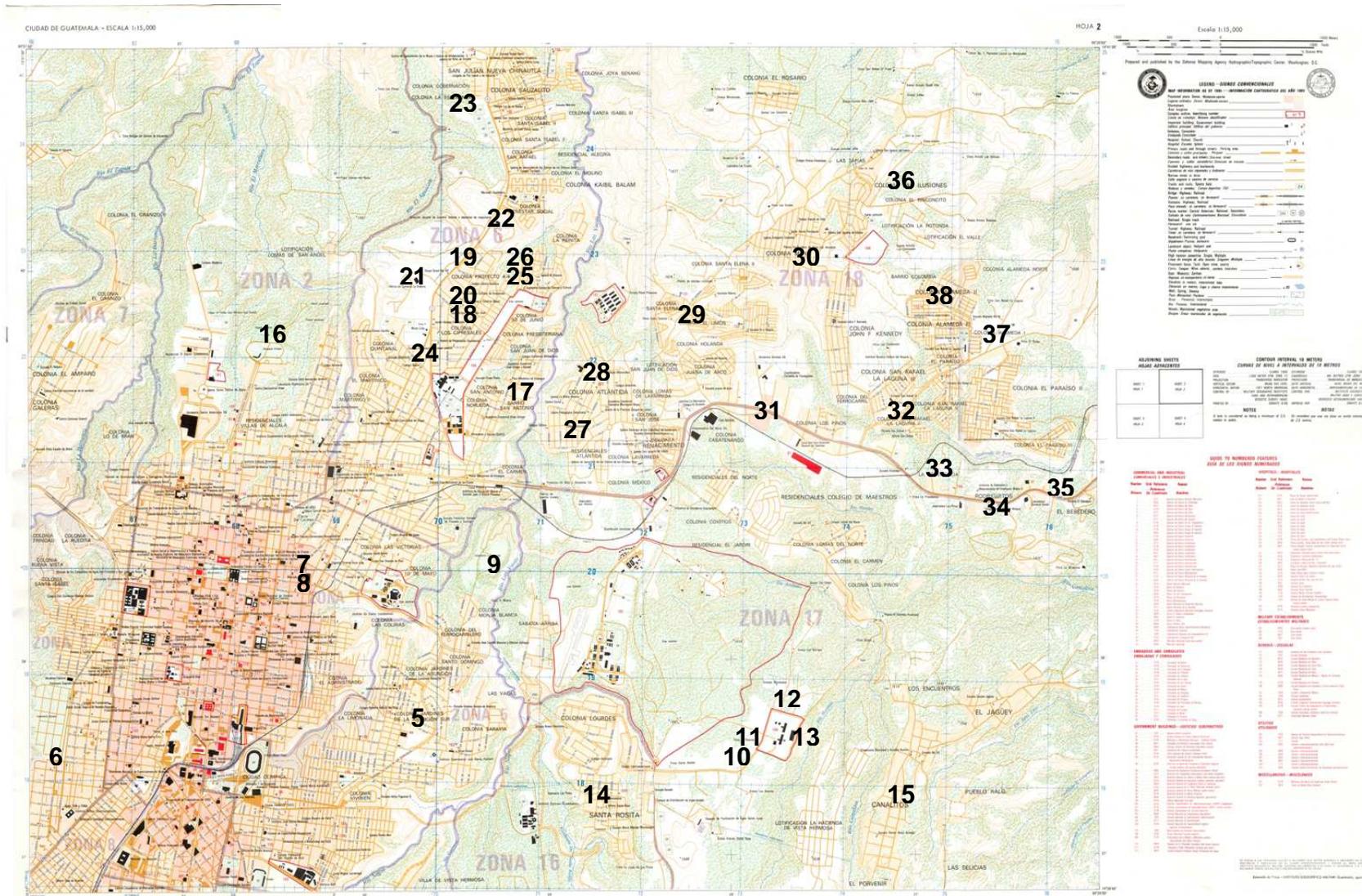


Fig.10 Mapa del sureste del área metropolitana de Guatemala
 “Ubicación de pozos muestreados”

