



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

**APLICACIÓN DEL BALANCE IÓNICO Y CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE PIPER
PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL INDUSTRIAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Karla Anabella Mis Juarez

Asesorada por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, enero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DEL BALANCE IÓNICO Y CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE PIPER
PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL INDUSTRIAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KARLA ANABELLA MIS JUAREZ

ASESORADA POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, ENERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Chistian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Mariam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Mercedes Esther Roquel Chávez
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**APLICACIÓN DEL BALANCE IÓNICO Y CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE PIPER
PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL INDUSTRIAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha enero de 2014.



Karla Anabella Mis Juarez



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, 17 de Agosto 2016

Ingeniero Químico

Wong Davi, Carlos Salvador

Director, Escuela de Ingeniería Química

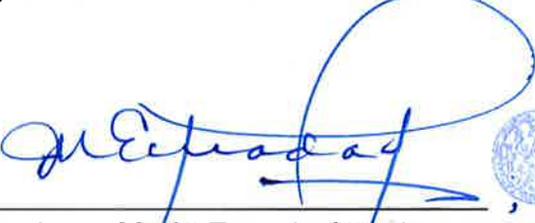
Facultad de Ingeniería USAC

Estimado Señor Director:

Reciba un cordial saludo. El motivo de la presente carta es para informarle que en mi calidad de asesor de la estudiante Karla Anabella Mis Juarez, carné 200818852, he revisado el informe final de su trabajo de graduación, titulado, "*Aplicación del balance iónico y construcción del diagrama de Piper para la evaluación del potencial industrial de las aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala*".

Dado que los aspectos metodológicos del informe final se ajustan al perfil de egreso de nuestra escuela, no tengo inconveniente en aprobar el informe y lo remito a usted para la continuación de los trámites subsiguientes.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades, atentamente,

F. 
Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
Ingeniero Químico, colegiado 685
Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Química

 Jorge Mario Estrada Asturias
Ingeniero Químico Col. 685
Profesor Titular
Escuela de Ina. Química USAC



Guatemala, 11 de octubre de 2016.
 Ref. EIQ.TG-IF.058.2016.

Ingeniero
 Carlos Salvador Wong Davi
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **142-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Karla Anabella Mis Juarez**.
 Identificada con número de carné: **2008-18852**.
 Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

APLICACIÓN DEL BALANCE IÓNICO Y CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE PIPER PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL INDUSTRIAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CIUDAD DE GUATEMALA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


 Ing. Jaime Domingo Carranza Gonzalez
 COORDINADOR DE TERNA

Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.073.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **KARLA ANABELLA MIS JUAREZ** titulado: **"APLICACIÓN DEL BALANCE IÓNICO Y CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE PIPER PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL INDUSTRIAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CIUDAD DE GUATEMALA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.063-2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DEL BALANCE IÓNICO Y CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE PIPER PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL INDUSTRIAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por la estudiante universitaria: **Karla Anabella Mis Juarez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, enero de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la firmeza en cada paso que doy, ya que sin él no podría haber culminado esta parte de mi vida.
- Mis papás** Anabella Juárez (q. e. p. d.) y Abel Ernesto Mis, por ser el principal pilar en mi vida, las personas que formaron mis cimientos de valores y creencias.
- Hermanos** Carlos, Erick, Rudy y Evelyn, por ser una fuente de inspiración espiritual, personal, y por todo su apoyo brindado durante mi carrera.
- Amiga** Carol González, por estar en cada paso dado, por sus consejos tanto en mi vida profesional como personal, y por estar a mi lado desde el inicio hasta el final de este viaje.
- Amigo** Damián Rivera Ochoa, por haberme acompañado en el inicio de mi vida profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

- | | |
|---|---|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por darme la oportunidad de concluir mi carrera profesional y las herramientas necesarias para poner en práctica los conocimientos adquiridos a este nivel. |
| Facultad de Ingeniería | Por ser una importante influencia en mi carrera y por proveerme los recursos necesarios para enfrentarme a los retos del día a día en el área profesional. |
| Mis amigos de la Facultad | Carol González, Antonio Fiorini, Sindi Reyes, Kelly Cortéz, José Ramás, Eddie Raxón, José Istupe, Mario Maldonado y Damián Ochoa, porque mi vida universitaria y personal no habrían sido las mismas si no hubiera tenido el privilegio de compartirla con ustedes. |
| Ing. Jorge Mario Estrada | Por su apoyo incondicional en la realización del trabajo final de graduación. |

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Calidad del agua y parámetros.....	3
2.1.1. Análisis físico.....	3
2.1.1.1. Aspecto.....	4
2.1.1.2. Olor.....	4
2.1.1.3. Color.....	4
2.1.1.4. Turbiedad.....	5
2.1.1.5. Temperatura.....	5
2.1.1.6. Potencial de hidrógeno (pH).....	5
2.1.1.7. Sólidos totales disueltos.....	5
2.1.2. Análisis químicos.....	6
2.1.2.1. Dureza total.....	6
2.1.2.2. Alcalinidad total.....	6
2.1.2.3. Cloro residual.....	6
2.1.2.4. Iones.....	7

2.1.3.	Exámenes bacteriológicos	8
2.1.3.1.	Grupo coliforme	9
2.1.3.2.	Prueba presuntiva.....	9
2.1.3.3.	Prueba confirmativa.....	10
2.1.3.4.	Expresión de resultados	10
2.1.3.5.	Cálculo de número más probable (NMP)	10
2.1.4.	Análisis hidrogequímicos	11
2.1.4.1.	Diagramas poligonales y radiantes	11
2.1.4.1.1.	Diagrama de Stiff modificado	11
2.1.4.1.2.	Clasificación de las aguas.....	11
2.1.4.1.3.	Clasificaciones simples	12
2.1.4.1.4.	Clasificaciones geoquímicas	13
2.1.4.1.5.	Clasificación de Chase Palmer	14
2.1.4.1.6.	Clasificación de Souliné.....	16
2.1.4.1.7.	Clasificación de Scholler.....	17
2.2.	Diagrama de Piper	19
2.2.1.	Generalidades	19
2.2.2.	Usos	21
2.2.3.	Criterios para la selección de iones	22
2.2.4.	Construcción del diagrama de Piper	23
2.2.4.1.	Pasos	23

2.3.	Zonas industriales de la Ciudad de Guatemala.....	24
2.4.	IONES de interés en clasificación del agua.....	24
2.5.	Evaluación del potencial industrial de aguas subterráneas	25
2.5.1.	Integración de factores.....	26
2.6.	Marco legal e instituciones relacionadas.....	28
2.6.1.	Marco Legal	29
2.6.1.1.	Constitución Política de la República ...	29
2.6.1.2.	Código Civil.....	30
2.6.2.	Instituciones relacionadas	31
2.7.	Dirección de agua freática	32
2.8.	Caracterización de zona industrial	38
2.9.	Clasificación de las empresas según la actividad que desarrollan.....	39
2.10.	Distancia del pozo a zona industrial.....	43
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	47
3.1.	Determinación de los parámetros fisicoquímicos	47
3.2.	Variables	47
3.3.	Delimitación del campo de estudio	48
3.4.	Recursos humanos disponibles	48
3.5.	Recursos materiales disponibles	48
3.5.1.	Materia prima.....	49
3.6.	Recursos materiales disponibles	49
3.6.1.	Laboratorios.....	49
3.7.	Técnica de investigación.....	49
3.8.	Recolección y ordenamiento de la información.....	50
3.9.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	51
3.10.	Análisis estadístico	53

3.10.1.	Determinación del número de repeticiones.....	53
3.10.2.	Análisis de la cantidad de tratamientos.....	54
3.11.	Plan de análisis de resultados.....	56
3.11.1.	Muestra de la construcción del diagrama de Piper.....	56
3.11.2.	Programas a utilizar para análisis de datos	63
3.11.3.	Prueba de la hipótesis nula y alternativa	63
4.	RESULTADOS	65
4.1.	Balance iónico del agua en los diferentes pozos	65
4.2.	Diagrama de Piper de los pozos que se encuentran en las zonas 18, 12, 23 y 24 durante los tres años estudiados	67
4.3.	Comparación estadística de la actividad iónica presente en cada pozo. Análisis de ventajas y desventajas de los pozos ...	68
4.4.	Diagrama de Piper de los pozos que se encuentran en las diferentes zonas y determinación del potencial industrial	70
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	73
	CONCLUSIONES	79
	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA	83
	APÉNDICES	89
	ANEXOS	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama de Piper	20
2.	Tipos de agua y su clasificación	21
3.	Metodología utilizada para la evaluación del potencial de aguas subterráneas de Guatemala	27
4.	Mapa de potencial de aguas subterráneas de Guatemala.....	28
5.	Agua subterránea y pozos.....	33
6.	Ciclo hidrológico del agua	34
7.	Dirección del agua freática cuando se perfora un pozo	34
8.	Flujo de agua subterránea.....	35
9.	Dirección de aguas subterráneas	36
10.	Dirección de aguas subterráneas en el departamento de Guatemala ...	37
11.	Aldeas que limitan al municipio de Guatemala	38
12.	Giro de empresas ubicadas en Guatemala.....	39
13.	Diagrama de flujo de proceso.....	50
14.	Ejemplo de diagrama de Piper	56
15.	Triángulo de cationes	57
16.	Triángulo de cationes	62
17.	Traslado de triángulos hacia rombo	62
18.	Diagrama de Piper	67
19.	Diagrama de Piper de la zona 18	70
20.	Diagrama de Piper de las zonas 23 y 24	71
21.	Diagrama de Piper de la zona 12	71

TABLAS

I.	Clasificación de grupos geoquímicas	13
II.	Clasificación Chase Palmer	15
III.	Clasificación Souliné I	16
IV.	Clasificación Souliné II	16
V.	Clasificación Scholler I	17
VI.	Clasificación Scholler II	18
VII.	Clasificación Scholler III	18
VIII.	Clasificación de las empresas localizadas en las zonas 24 y 25	40
IX.	Clasificación de las empresas localizadas en las zonas 17 y 18	41
X.	Clasificación de las empresas localizadas en la zona 12	42
XI.	Distancia del pozo a zona industrial, zonas 24 y 25, en km.	43
XII.	Distancia del pozo a zona industrial, zonas 17 y 18, en km.	44
XIII.	Distancia del pozo a zona industrial, zona 12, en km.	45
XIV.	Definición de variables independientes	47
XV.	Cuantificación de los iones presentes en los pozos de las zonas 17 y 18.....	51
XVI.	Cuantificación de los iones presentes en los pozos de las zonas 23 y 24.....	52
XVII.	Cuantificación de los iones presentes en los pozos de la zona 12	52
XVIII.	Variables para el diseño unifactorial	54
XIX.	Análisis de varianza para el diseño unifactorial	55
XX.	Composición de cationes y aniones	57
XXI.	Promedio de los iones	59
XXII.	Concentración de iones en meq/L.....	60
XXIII.	Concentración de iones en porcentaje	61
XXIV.	Balance iónico de los pozos de la zona 18	65
XXV.	Balance iónico de los pozos de las zonas 23 y 24	66

XXVI.	Balance iónico de los pozos de la zona 12	66
XXVII.	Promedio y desviación estándar de la diferencia iónica por pozo.....	68
XXVIII.	Análisis de varianza de un factor con respecto a la sumatoria de los aniones y cationes.....	69
XXIX.	Clasificación del agua de acuerdo a su ubicación en el diagrama de Piper.....	72
XXX.	Capas temáticas.....	72

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Ca⁺²	Calcio
CaCO₃	Carbonato de calcio
Cl⁻	Cloruros
Mg⁺²	Magnesio
meq/L	Mili equivalentes por litro
mg/L	Miligramos por litro
K⁺¹	Potasio
Q	Quetzales
Na⁺¹	Sodio
SO₄⁻²	Sulfatos

GLOSARIO

Alcalinidad	Medida de la cantidad de sales básicas disueltas en el agua. Se cuantifica por medio de titulaciones ácido-base y generalmente se expresa en miligramos por litro de CaCO_3 . Da una referencia de la neutralidad relativa del agua potabilizada.
Densidad de drenaje	Es la longitud de los cauces presentes en el mapa de la cartografía base a una determinada escala, por el área de la unidad hidrográfica.
Diagrama de Piper	Diagrama donde se incluyen aniones y cationes en forma simultánea. Está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios.
Diagramas hidrogeoquímicos	Representación gráfica de los datos hidroquímicos. Constituye una herramienta de trabajo muy eficiente en la interpretación de las propiedades del agua, así como para hacer comparaciones o correlaciones. También permite ver con facilidad el comportamiento y evolución del agua en un territorio determinado y a través del tiempo.

Dureza del agua

Se denomina dureza del agua a la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio.

Geomorfología kárstica

El conjunto de procesos que desarrollan modelados kársticos recibe el nombre de karstificación. Es una meteorización mezcla de acciones químicas (disolución, hidratación, sustitución iónica y óxido-reducción) y físicas (transferencia de masa y difusión).

RESUMEN

En el presente trabajo se determinó la calidad del agua de los pozos ubicados en zonas industriales de la ciudad de Guatemala, específicamente en las zonas 12, 17, 18, 24 y 25. Para ello se utilizaron fundamentos teóricos para la evaluación de la actividad iónica del agua subterránea presente en pozos, a partir de un balance iónico y la construcción de un diagrama de Piper. Todos los datos utilizados fueron tomados de forma retrospectiva, siendo estos los años 2013, 2014 y 2015, con el fin de determinar si con el paso del tiempo el agua cambia sus componentes químicos, los cuales pueden interferir en la calidad química de la misma.

La técnica utilizada en el balance iónico fue un análisis de iones, evaluando diferentes muestras para la construcción del diagrama; también se realiza análisis de las capas temáticas para evaluar el potencial industrial y definir la calidad del agua. Los datos recabados fueron analizados por métodos estadísticos para definir si hay una diferencia significativa entre la calidad del agua comparada con respecto a los datos entre pozos.

En cuanto al balance iónico, la mayor diferencia la poseen los pozos ubicados en zona 12, y la menor diferencia los ubicados en zonas 18 y 24. Evaluando el potencial industrial se encontró que el agua en los distintos pozos posee un comportamiento similar entre ellos, según las capas temáticas estudiadas. El diagrama de Piper también afirma este comportamiento de igualdad entre muestras, debido a que todos los resultados se interceptan en una misma área del diagrama, siendo los pozos de San Rafael, Canalitos y Mirador de la Cruz los que poseen mejor potencial industrial.

OBJETIVOS

General

Evaluar el potencial industrial de las aguas subterráneas de la ciudad de Guatemala, a través de la aplicación del balance iónico y construcción del diagrama de Piper.

Específicos

1. Determinar la composición iónica del agua a través de un balance iónico en pozos que se encuentran en zonas industriales de la ciudad de Guatemala.
2. Aplicar los datos recaudados de los iones en el diagrama de Piper.
3. Comparar la actividad iónica presente en el agua haciendo un análisis de las ventajas y desventajas que presenta en cada pozo, por medio de los parámetros estadísticos.
4. Evaluar el tipo de agua de cada punto respecto a su ubicación dentro del diagrama y determinar cuál pozo es el que posee mejor potencial industrial.

Hipótesis

Hipótesis científica

La variación de la ubicación de los pozos en el balance iónico puede afectar el potencial industrial que posee el agua.

Hipótesis estadística

Como el interés es probar la igualdad de los efectos del tratamiento, se proponen las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula:

H_{0_1} = El potencial industrial que posee el agua de los pozos es el mismo, según los datos recaudados.

$$T_1 = T_2 = \dots = T_i = 0$$

- Hipótesis alternativa:

H_{i_1} = El potencial industrial que posee el agua de los pozos no es el mismo, según los datos recaudados.

$$T_1 \neq T_2 \neq \dots \neq T_i \neq 0 \text{ al menos una } i$$

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. Generalmente su estado es líquido, pero la misma puede hallarse en forma sólida o gaseosa.

Se plantea la realización de un estudio de agua de pozos ubicados en las zonas industriales de la ciudad de Guatemala. Para poder conocer el tipo de agua resulta necesario y relevante conocer algunos aspectos que caracterizan a este tipo de aguas, como lo son los iones que tienen presentes, qué es un diagrama hidrológico, cómo poder analizar este en el diagrama de Piper. En este trabajo se presentan y desarrollan estos puntos a modo de establecer las características del agua, constituyendo los parámetros previos para el estudio de las muestras obtenidas.

Actualmente, a nivel mundial, existe una fuerte tendencia para lograr una mayor explotación de este recurso, sin afectar su calidad, por lo cual se han fijado parámetros que evalúan la misma. Dichos parámetros están fijados de acuerdo al uso que se le da al agua. En Guatemala se fijan los parámetros de calidad para el consumo humano en la Norma Coguanor NGO 29 001:99.

Teniendo en cuenta las regiones hidrográficas que posee el país, se cuantifican siete iones diferentes presentes en el agua de nueve pozos, y es útil analizarlos a través del diagrama de Piper para poder evaluar el potencial industrial que posee el agua en la región de la ciudad de Guatemala, aunque el uso fundamental de este diagrama es realizar una interpretación preliminar de datos hidroquímicos, consistente en la conformación geológica del área, lo que

ayuda a interpretar los potenciales de explotación del agua subterránea para uso industrial.

La realización de gráficas resulta primordial para que se pueda observar de forma efectiva la tendencia y el estatus de las distintas aguas, dado que se tiene condensada toda la información que se cuantificó durante la investigación.

La parametrización de los pozos fue un factor clave para la gestión de los mismos, por ello también se realizó una proyección con las limitantes de la naturaleza y los parámetros de medición establecidos durante esta investigación, con base en los datos históricos manejados durante la experimentación, para tener un margen de error escaso y controlado en los pronósticos.

1. ANTECEDENTES

El diagrama de Piper o diagrama triangular es utilizado para interpretar datos hidroquímicos e ideal para presentar tres componentes de forma simultánea. Los tres componentes son iones y juegan un papel importante en el análisis químico del agua, esto con el objetivo de poder identificar los iones presentes en el agua, para lo que se deben tomar en cuenta los siguientes criterios: origen, procesos y contaminación, con la finalidad de elaborar una tendencia y poder analizar para la toma de decisiones oportunas.

Villar afirma que “la 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, necesita considerar iones ajenos al sistema carbonato”¹. Con esta investigación él concluyó que el enfoque de hacer un tratamiento de agua subterránea en el área metropolitana de Guatemala debe estar en función de los requerimientos de calidad del agua en cada tipo de industria. Esto debido a que las exigencias de los parámetros necesarios de cumplimiento de cada planta dependen del fin que posee esta, es decir, que la calidad no es la misma para una industria alimenticia que para una industria que elabora plásticos y otras materias. Así fue como se determinó que la zona corrosiva incluye los pozos ubicados en las zonas 7, 11, 5 y 17, y la zona ligeramente incrustante incluye los pozos de la zona 18.

Cabe destacar que los modelos hidroquímicos han sido bastante utilizados y aplicados para la correcta representación gráfica y eficiente herramienta de

¹ VILLAR, Marco. *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 considerado iones ajenos al sistema carbonato*. 2008, pág. 32

trabajo para la interpretación de las propiedades del agua, así como para elaborar comportamientos, comparaciones o correlaciones. También son utilizados para poder ver con facilidad el comportamiento del agua en un territorio a través del tiempo. Estos modelos han presentado resultados satisfactorios en cuanto a su aplicación y, afortunadamente, para su elaboración ya se cuenta con la tecnología adecuada.

En su *Análisis de cuatro pozos muestreados*, Gramajo asegura que el agua es apta para el consumo humano, dado que cumple con los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de la norma COGUANOR NGO 29001². Es importante conocer los parámetros que rigen la calidad del agua para obtener el mayor beneficio y una rápida cuantificación, siempre y cuando los parámetros obtenidos estén en un rango de aceptabilidad lógico.

Debido a que las aguas subterráneas se pueden contaminar por varias fuentes, cabe destacar que Ramírez menciona que: “dentro de las posibles fuentes de contaminación de los acuíferos, se encuentran la infiltración de las fosas de absorción donde no existen sistemas de alcantarillado, así como el retorno de las aguas servidas por infiltración en ríos”³. Por eso es recomendable hacer un análisis bacteriológico de las aguas que se estudian, para descartar contaminación por bacterias, ya que este sería otro tipo de parámetro para la cuantificación de la calidad de la misma.

² GRAMAJO, Byron. *Determinación de la calidad del agua para consumo humano y uso industrial, obtenida de pozos mecánicos en la zona 11, Mixco, Guatemala..* 2004, p. 29

³ RAMÍREZ, Lilian. *Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad capital de Guatemala.* 2003, p. 131

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Calidad del agua y parámetros

La calidad del agua es esencial para el consumo humano, agricultura, ganadería e industria. El agua es fácilmente clasificada por la cantidad de sal disuelta en ella, según la cual el agua puede ser: salada, dulce o salobre. Generalmente se nota la presencia de aguas con elevados contenidos de sales debido a que entre los sedimentos se encuentran sales evaporíticas y carbonatos; dada su elevada solubilidad estos pasan rápidamente a la fase acuosa, resultando de esta manera aguas salobres y saladas. Cuando el agua es clasificada como dulce se encuentra presencia de bicarbonato y magnesio.

Existen parámetros que son medibles para determinar la calidad del agua, tales como: análisis físicos, análisis químicos, los exámenes bacteriológicos y los análisis hidrogequímicos. La contaminación de aguas sucede principalmente por la percolación de contaminantes de la superficie y como consecuencia de varias reacciones que cambian su composición química.

2.1.1. Análisis físico

Incluye medidas que pueden ser apreciadas por los sentidos. Sin embargo, se aplican ciertos parámetros que están normalizados con el fin de que no sea percepción humana la cuantificación de estos. Estos parámetros permiten tener un juicio bastante acertado de la calidad del agua desde este punto de vista. Los análisis físicos efectuados son:

2.1.1.1. Aspecto

Es un análisis cualitativo que se califica como: claro, ligeramente turbio y turbio, esto de acuerdo a una apreciación general del sentido de la vista de la persona que realice el análisis.

2.1.1.2. Olor

Los olores se deben a concentraciones de compuestos volátiles, algunos de los cuales se producen cuando se descompone la materia orgánica. La intensidad y lo ofensivo de los olores varía con el tipo de contaminación de la que se trate, la cual puede ser a tierra, moho o putrefactos. La mayoría de casos los olores son producidos por el plancton, dado que estos organismos desprenden vestigios de aceites esenciales volátiles que confieren al agua olores dulzones, aromáticos, a pescado, entre otros, debido a las muy pequeñas concentraciones de las sustancias que producen olores; los procedimientos analíticos no son satisfactorios para su medición y tiene que confiarse en el sentido del olfato.

2.1.1.3. Color

Es ocasionado usualmente por humus de los bosques o de la materia vegetal de los pantanos y áreas de poca profundidad. El color café amarillento como el del té en las aguas superficiales se debe a la materia colorante formada por los compuestos del humus y el ácido tánico, aunque en ciertos casos puede ser producido por las formas solubles y coloidales del hierro, o por las descargas de desechos industriales.

2.1.1.4. Turbiedad

Se debe a la dispersión e interferencia de los rayos luminosos, como resultado de la presencia de materia orgánica e inorgánica finamente dividida, como por ejemplo: arcilla, barro, plancton y otros microorganismos.

2.1.1.5. Temperatura

Termodinámicamente se considera como una medida de la energía térmica del movimiento desordenado de las moléculas en una sustancia en equilibrio térmico.

2.1.1.6. Potencial de hidrógeno (pH)

Se define arbitrariamente y por comodidad como el logaritmo de base 10 del inverso de la concentración del ión hidrógeno, y se emplea para expresar la actividad de este ión. La escala de pH varía de 1 a 14 grados, donde el valor 7° en el agua indica neutralidad. Un pH comprendido entre el valor neutro y 14° indica alcalinidad. Un pH comprendido entre uno y el valor neutro indica acidez.

2.1.1.7. Sólidos totales disueltos

Residuos o sólidos totales es el aspecto que indica la cantidad de materia que permanece como residuo después de un proceso de evaporación (103-105°C) y secado de una determinada muestra de agua. Se divide en:

- a) Residuos filtrables: incluye la porción del residuo total que pasa a través del filtro.

- b) No filtrables: incluye la porción del residuo total que es retenida por el filtro.
- c) Residuos fijos: incluye la porción del residuo total, que no ejerce una presión de vapor significativo a 600 °C, durante un período de una hora.

2.1.2. Análisis químicos

Son utilizados para determinar las cantidades de materia mineral y orgánica que pueden afectar la calidad del agua, dado que proporcionan datos acerca de contaminantes que pueden ocasionarse dentro de un determinado proceso de tratamiento, con lo cual se puede controlar el mismo. Los análisis químicos efectuados son:

2.1.2.1. Dureza total

Se determina si el agua es dura o blanda, de acuerdo a la cantidad de sales que posea. El agua dura se caracteriza por la concentración total de calcio y magnesio, expresada como carbonato de calcio (CaCO_3).

2.1.2.2. Alcalinidad total

Se refiere a la capacidad que posee el agua de neutralizar los ácidos, y es una medida de los constituyentes alcalinos del agua expresados como bicarbonatos, carbonatos e hidróxido.

2.1.2.3. Cloro residual

La presencia de cloro en el agua es común, dado que todas las aguas poseen. El cloro residual satisface necesidades en las plantas potabilizadoras

de agua. Puede reaccionar con amoníaco, hierro, manganeso, sustancias proteicas, sulfuro y algunas sustancias productoras de sabores y olores, mejorando las características del agua potabilizada. Cuando se realiza el proceso de desinfección por medio de cloro, es posible obtener en el agua dos formas, por medio de las cuales se manifiesta el residual de cloro disponible o activo en el agua. Estas formas son:

- Cloro residual libre disponible: este tipo de residual se obtiene cuando el agua se clora íntegramente; es decir, cuando la aplicación del cloro al agua es para producir directamente o mediante la destrucción del amoníaco presente en el agua, un residual de cloro libre.
- Cloro residual combinado disponible: este residual se obtiene cuando el cloro se aplica al agua con la finalidad de producir conjuntamente con el amoníaco, ya presente en el agua o agregado, un residual activo combinado.

El cloro residual libre disponible es regularmente más efectivo y más rápido en su acción bactericida que el cloro residual combinado disponible. Esto se debe a que el cloro residual combinado se encuentra presente en las formas monocloramina (NH_2Cl), dicloramina (NHCl_2) y tricloramina (NCl_3), que actúan como agentes oxidantes menos activos y más lentos en su acción. Los cloruros son inocuos de por sí, pero en cantidades altas dan sabor desagradable al agua.

2.1.2.4. Iones

La mayoría de los componentes químicos presentes en las aguas subterráneas son altamente reactivos, es decir, están sometidos a múltiples reacciones químicas entre el agua y el terreno. Esto hace que las

concentraciones de los mismos en solución varíen local y espacialmente debido, por ejemplo, a reacciones de disolución y precipitación mineral. Los componentes mayoritarios más reactivos son: Na, Ca, Mg, K, HCO₃ y SO₄. A estos componentes químicos se les llama “reactivos” o “no conservativos”.

2.1.3. Exámenes bacteriológicos

Existen algunas razones por las que los exámenes que se practican habitualmente al agua no aíslan los organismos patógenos:

- a) Los gérmenes patógenos lleguen al agua esporádicamente y no sobreviven en ella durante largo tiempo; por eso pueden no encontrarse en la muestra.

- b) Si es muy pequeño su número, es fácil que no se encuentren aplicando las técnicas de investigación.

Los exámenes que se practican al agua consisten en la investigación de ciertas especies bacterianas que se encuentran normalmente en el intestino grueso del hombre y de otros animales de sangre caliente. Estas patógenas son un buen índice del grado de seguridad bacteriológica de un cuerpo de agua. Estas especies bacterianas son más resistentes que las patógenas, por lo que se encuentran ausentes en el agua, entonces hay una indicación de que el agua es bacteriológicamente segura para el consumo humano. Sin embargo, si hay presencia de estas especies, es una indicación de que se pueden encontrar presentes organismos patógenos y que el agua para bebidas es insegura. Estas especies bacterianas tienen por denominación "el grupo coliforme".

2.1.3.1. Grupo coliforme

Lo forman las bacterias escherichiacoli y enterobacteraerogenes. El grupo coliforme se divide en dos: coliforme total y coliforme fecal. Entre las principales características del grupo coliforme están:

- Bacilos aerobios a anaerobios facultativos.
- No esporulados.
- Gram-negativos.
- Fermentan la lactosa con producción de ácido y gas de 24 a 48 horas, a las temperaturas siguientes:
 - 35 +/- 0,2° C para el grupo coliforme total
 - 45 +/- 0,5° C para el grupo coliforme fecal

2.1.3.2. Prueba presuntiva

Se deben sembrar volúmenes de la muestra de agua en tubos con un medio de cultivo de caldo lactosado y observar si se produce gas después de un período de incubación (24 - 48 horas a 35,0°C). Se esperan los siguientes resultados:

- Negativa: la ausencia de gas prueba que no existen bacterias coliformes.
- Positiva: la presencia de gas en los tubos de caldo lactosado.

Sin embargo, es necesario realizar la prueba para confirmarla, ya que no necesariamente la formación de gas se debe a otro tipo de microorganismos que no constituyen índices.

2.1.3.3. Prueba confirmativa

Se deben inocular todos los tubos que den un resultado positivo en la prueba presuntiva, en un medio de cultivo adecuado que depende del grupo coliforme a investigar. Al igual que la prueba presuntiva, la ausencia de gas después del período de incubación constituye una prueba negativa, y la presencia de gas una prueba positiva, con la diferencia de que de ser positiva la prueba, confirma la presencia del grupo coliforme que se haya investigado.

2.1.3.4. Expresión de resultados

Dado que el método de los tubos de fermentación por diluciones múltiples se basa en leyes probabilísticas, los resultados se expresan por medio de un índice denominado Número Más Probable (NMP). Es este un índice del número más probable de bacterias coliformes (totales), que tienen más probabilidad de ocurrir sobre cualquier otro número en los resultados obtenidos por medio del examen bacteriológico.

2.1.3.5. Cálculo de número más probable (NMP)

Se calcula de las diversas combinaciones de resultados positivos y negativos que se obtienen de la prueba confirmativa del examen bacteriológico realizado por este método. Para esto se hace necesario utilizar el procedimiento de cálculo, y las tablas del NMP de bacterias coliformes en 100 ml de agua de muestra, que presenta el "Estándar Methods for the Examination of Water and Waterwater".

2.1.4. Análisis hidrogequímicos

Se estudian las principales características físico-químicas de las aguas, para poder apreciar los principales rasgos de las muestras analizadas y sus variaciones espaciales, se pueden representar los resultados en los siguientes diagramas:

2.1.4.1. Diagramas poligonales y radiantes

Es una representación gráfica de las características químicas de un acuífero y su utilidad, subdivididos a su vez en:

2.1.4.1.1. Diagrama de Stiff modificado

Consiste en tomar, sobre semirrectas convergentes o paralelas, segmentos proporcionales a cada ion y unir los extremos dando así un polígono. Sobre cada semirrecta se toma un solo ion o bien un catión y un anión simultáneamente. La forma de la figura resultante da idea del tipo de agua. Los tipos de figuras pueden ser: radiantes y poligonales paralelos.

2.1.4.1.2. Clasificación de las aguas

El agua subterránea se clasifica para determinar su composición química u otros aspectos. Las clasificaciones simples solo dan una información global, y en general se establecen dando énfasis a las características que más interesa destacar y varían de un lugar a otro, según las necesidades y disponibilidades de agua. Las clasificaciones geoquímicas contienen más información de carácter geoquímico y, en cierta manera, tienden a expresar de forma concisa lo que se obtiene con los diferentes tipos de diagramas.

2.1.4.1.3. Clasificaciones simples

- Por el residuo seco:
 - Agua dulce de 0 a 2 000 ppm, a veces 3 000
 - Agua salobre hasta 5 000 ppm, a veces 10 000
 - Agua salada, hasta 40 000 ppm, a veces 100 000
 - Salmuera hasta saturación

- b) Por la dureza:
 - Blanda de 0 a 50 ppm en CaCO_3 , a veces hasta 60
 - Algo dura hasta 100 ppm en CaCO_3 , a veces hasta 120
 - Dura hasta 200 ppm en CaCO_3 , a veces hasta 250
 - Muy dura hasta saturación

- Por propiedades destacadas, según los usos:
 - Selenitosa si tiene más de 500 o 600 ppm en SO_4 .
 - Ferruginosa, si tiene hierro en cantidad tal que produce un precipitado de óxido de hierro, al tomar contacto con el aire.
 - Carbónica, si desprende burbujas de CO_2 a la temperatura y presión ambientes.
 - Lítica, si contiene cantidades medibles de ese elemento.
 - Sulfhídrica, si huele a ácido sulfhídrico (a veces llamada impropriamente sulfurosas).

- Clasificación SAR
 - Esta clasificación tiene en cuenta la conductividad del agua C y el valor SAR.

2.1.4.1.4. Clasificaciones geoquímicas

Se nombra el agua por el anión o el catión que sobrepasa el 50 % de sus sumas. Si ninguno supera el 50 %, se nombran los dos más abundantes. Si conviene, se puede añadir el nombre de algún ion menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta. Para simplificar la expresión a cada posible ordenación de aniones y cationes, se les da un número y una letra que sirven para denominar el agua. Cuando interese resaltar, además de la mineralización total del agua, se puede añadir una clasificación de acuerdo con la conductividad. Los grupos que se hacen se muestran en la siguiente tabla:

Tabla I. **Clasificación de grupos geoquímicas**

<u>Aniones</u>		<u>Cationes</u>
1 r Cl > r SO ₄ > r HCO ₃	a	r Na > r Mg > r Ca
2 r Cl > r HCO ₃ > r SO ₄	b	r Na > r Ca > r Ca
3 r SO ₄ > r Cl > r HCO ₃	c	r Mg > r Na > r Ca
4 r SO ₄ > r HCO ₃ > r Cl	d	r Mg > r Ca > r Na
5 r HCO ₃ > r Cl > r SO ₄	e	r Ca > r Na > r Mg
6 r HCO ₃ > r SO ₄ > r Cl	f	r Ca > r Mg > r Na

Fuente: RAMIREZ, Lilian. *Tesis. Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad Capital de Guatemala*. P. 100

C-1 Conductividad a 25°C entre 0 y 250 u S/cm (entre 0 y 215 a 18°C)

C-2 Conductividad a 25°C entre 250 y 750 u S/cm (entre 215 y 650 a 18°C)

C-3 Conductividad a 25°C entre 750 y 2250 u S/cm (entre 650 y 2000 a 18°C)

C-4 Conductividad a 25°C mayor que 2250 u S/cm (mayor que 2000 a 18°C)

La simplicidad de estas clasificaciones no permite, en general, buenas deducciones en cuanto a relaciones entre aguas, pero se adapta bien a determinar zonas en planos de composición química, por emplear dos signos acompañados o no de la indicación de salinidad. Se adapta bien a su representación en diagramas triangulares. (Ver figura 1).

2.1.4.1.5. Clasificación de Chase Palmer

Esta clasificación geoquímica es la más antigua y su interés es histórico, aunque sirve como base a otras clasificaciones posteriores. Se basa en la comparación de aniones con cationes en un cierto orden, como si se tratase de formar sales hipotéticas por orden de mayor a menor solubilidad.

Esta clasificación distingue en el agua dos propiedades fundamentales: la salinidad y la alcalinidad. La salinidad corresponde a las sales de aniones no hidrolizables, principalmente los cloruros, sulfatos y nitratos; la alcalinidad es debida a sales hidrolizables, principalmente los bicarbonatos. Los cationes se dividen en tres clases:

- Los que comunican propiedades primarias o alcalinos, Na^{+1} y K^{+1}
- Los que comunican propiedades secundarias o alcanotérreos, Ca^{+2} y Mg^{+2}
- Los que comunican propiedades terciarias o hidrolizables, como H^{+1} , Al^{+3} y otros.

En la clasificación de Palmer se trabaja en % de meq/l de aniones y de cationes. Sin embargo, para efectos de ordenación, basta trabajar directamente con los contenidos en meq/l, debiendo equilibrar previamente la pequeña

diferencia entre la suma de aniones y la de cationes. Para determinar la clasificación, sea:

$$\begin{aligned}
 A &= \text{propiedades primarias} & = 1 &= \% (r \text{ Na} + r \text{ K}) \\
 B &= \text{propiedades secundarias} & = 2 &= \% (r \text{ Ca} + r \text{ Mg}) \\
 C &= \text{propiedades terciarias} & = 3 &= \% (r \text{ H} + r \text{ Al}) \\
 D &= \text{salinidad} & = S &= \% (r \text{ Cl} + r \text{ SO}_4 + r \text{ NO}_3) \\
 E &= \text{alcalinidad} & = A &= \% (r \text{ HCO}_3 + r \text{ CO}_3)
 \end{aligned}$$

Debiéndose cumplir que $a + b + c = d + e$

En las aguas, se encuentra salinidad primaria S1, salinidad secundaria S2, salinidad terciaria S3, alcalinidad primaria A1 y alcalinidad secundaria A2. No es posible la alcalinidad terciaria A3. La agrupación se realiza según la siguiente tabla:

Tabla II. **Clasificación Chase Palmer**

Clase	S1	S2	S3	S4	S5
$d < a$	d	0	0	$a - d$	b
$d = a$	$a = d$	0	0	0	b
$a + b > d > a$	a	$d - a$	0	0	$a + b - d$
$d = a + b$	a	b	0	0	0
$d > a + b$	a	b	$d - a - b$	0	0

Fuente: RAMIREZ, Lilian. *Tesis. Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad Capital de Guatemala.* p. 101

Una muestra de agua no puede tener más de tres de las cinco propiedades. Esta clasificación es muy deficiente, por tener una agrupación un tanto arbitraria y englobar varios iones en una misma propiedad. El manejo de

tantos por ciento crea otra diferencia, al no poderse apreciar el total de meq/l presentes.

2.1.4.1.6. Clasificación de Souliné

Se trata de una clasificación propuesta en 1948, que pretende evidenciar los fenómenos de cambios de bases. El agua se clasifica de acuerdo con su tipo, grupo y clase, como se presenta en las siguientes tablas:

Tabla III. **Clasificación Souliné I**

Tipo	Denominación	$r(\text{Na} - \text{Cl}) / r\text{SO}_4$	$r(\text{Na} - \text{Cl}) / r\text{Mg}$
1	Sulfatado sódico	> 1	Negativo
2	Bicarbonatado sódico	< 1	Negativo
3	Clorurado magnésico	negativo	> 1
4	Clorurado cálcico	negativo	< 1

Fuente: RAMIREZ, Lilian. *Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad Capital de Guatemala*. p. 103.

Tabla IV. **Clasificación Souliné II**

Grupo	Características	Clase	Características (Palmer)
A	$r \text{HCO}_3^-$ dominante	a	A2, dominante
B	$r \text{SO}_4^-$ dominante	b	S2, dominante
C	$r \text{Cl}^-$ dominante	c	S1, dominante
D		d	S3, dominante
		e	A1, dominante
		f	A3, dominante

Fuente: RAMIREZ, Lilian. *Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad Capital de Guatemala*. p. 103.

2.1.4.1.7. Clasificación de Scholler

Esta clasificación propuesta en 1955 tiene en cuenta los valores absolutos de las concentraciones de cada ion, pero conduce a una denominación complicada. Se distingue: a) tipo en el que participan los aniones fundamentales en el orden Cl^- , $\text{SO}_4 = \text{HCO}_3^-$, aportando cada uno un signo; b) grupo dado por la relación entre iones y formado por tres símbolos, y c) clase dada por la clasificación expuesta en el apartado a).

Tabla V. Clasificación Scholler I

Grupo de cloruros	Denominación	Valor r Cl	Observaciones
1	Hiperclorurado	> 700	hasta saturación
2	Clorotalasico	700 a 420	agua del mar 560
3	Clorurado fuerte	420 a 140	
4	Clorurado medio	140 a 40	
5	Oligoclorurado	40 a 15	
6	Clorurado normal	< 10	

Fuente: RAMIREZ, Lilian. *Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad Capital de Guatemala*. p. 104.

Tabla VI. **Clasificación Scholler II**

Grupo de sulfatos	Denominación	Valor r SO ₄	Observaciones
1	Hipersulfatado	> 58	agua del mar 58
2	Sulfatado	58 a 24	
3	Oligosulfatado	24 a 6	
4	Sulfatado normal	< 6	

Fuente: RAMIREZ, Lilian. *Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad Capital de Guatemala*. p. 104.

Tabla VII. **Clasificación Scholler III**

Grupo de bicarbonatos	Denominación	Valor r HCO ₃
1	Hiperbicarbonatado	> 7
2	Bicarbonatado normal	7 a 2
3	Hipobicarbonatado	< 2

Fuente: RAMIREZ, Lilian. *Tesis. Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad Capital de Guatemala*. p. 104.

2.2. Diagrama de Piper

Es utilizado para la interpretación preliminar de datos hidroquímicos. El uso de este diagrama está estrechamente relacionado con el balance iónico, ya que a partir de estos datos es como se construye.

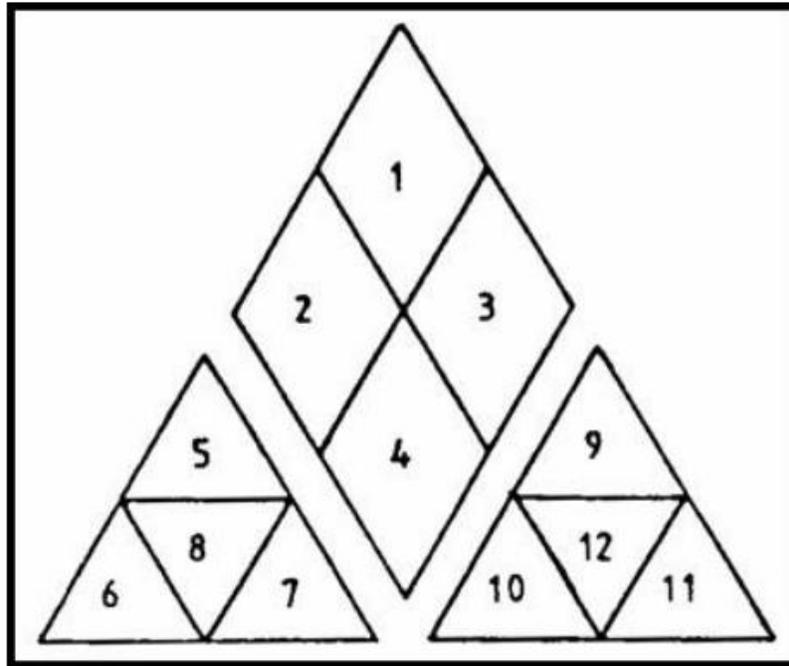
2.2.1. Generalidades

Consiste en la interpretación geológica del área, y con el tratamiento de datos se da a conocer la distribución espacial y la evolución temporal; también forma parte de una de las técnicas gráficas que se posee para la interpretación de los datos.

La mayoría de los componentes químicos mayoritarios en las aguas subterráneas son altamente reactivos, es decir, están sometidos a múltiples reacciones químicas entre el agua y el terreno durante el flujo del agua subterránea por el medio. Esto hace que las concentraciones de los mismos en solución varíen local y espacialmente debido, por ejemplo, a reacciones de disolución y precipitación mineral. Los componentes mayoritarios más reactivos son: Na, Ca, Mg, K, HCO_3 y SO_4 . A estos componentes químicos se les llama “reactivos” o “no conservativos”.

Los Diagramas de Piper o Triangulares son ideales para representar tres componentes (aniones y cationes) en forma simultánea. Las aguas químicamente semejantes se encontrarán agrupadas, y pueden clasificarse por su ubicación en el diagrama según la figura mostrada en la página siguiente:

Figura 1. Diagrama de Piper



Fuente: *Clasificación de aguas*. http://www.bdh.lapampa.gov.ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos.html. Consulta: 4 de agosto de 2013.

- 1) Aguas sulfatadas y cloruradas , cálcicas y magnésicas
- 2) Aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas
- 3) Aguas cloruradas y sulfatadas sódicas
- 4) Aguas bicarbonatadas sódicas
- 5) Aguas magnésicas
- 6) Aguas cálcicas
- 7) Aguas sódicas
- 8) Aguas magnésicas, cálcicas y sódicas
- 9) Aguas sulfatadas
- 10) Aguas bicarbonatadas
- 11) Aguas cloruradas
- 12) Aguas sulfatadas, bicarbonatadas y clorurada

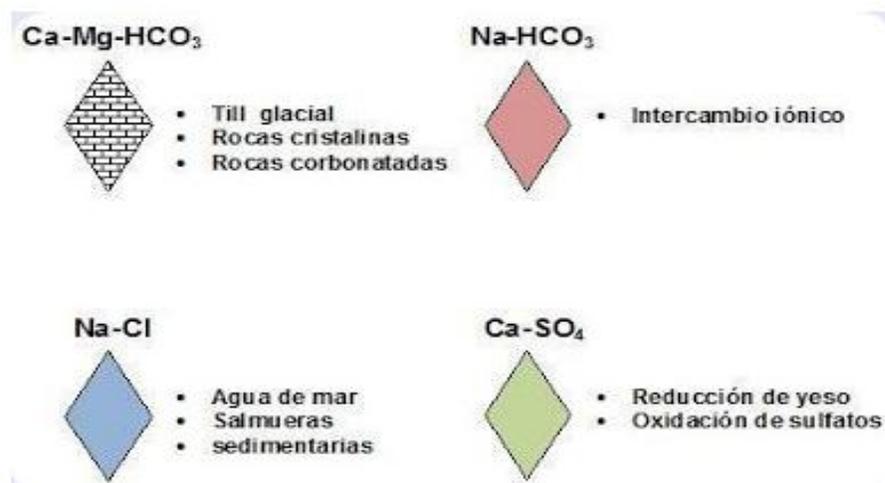
2.2.2. Usos

La utilidad de estos diagramas es la posibilidad de representar muchos análisis en un mismo gráfico, sin dar origen a confusiones. Las aguas químicamente semejantes se encontrarán agrupadas y pueden clasificarse por su ubicación en el diagrama. Lo más importante es saber para qué sirve:

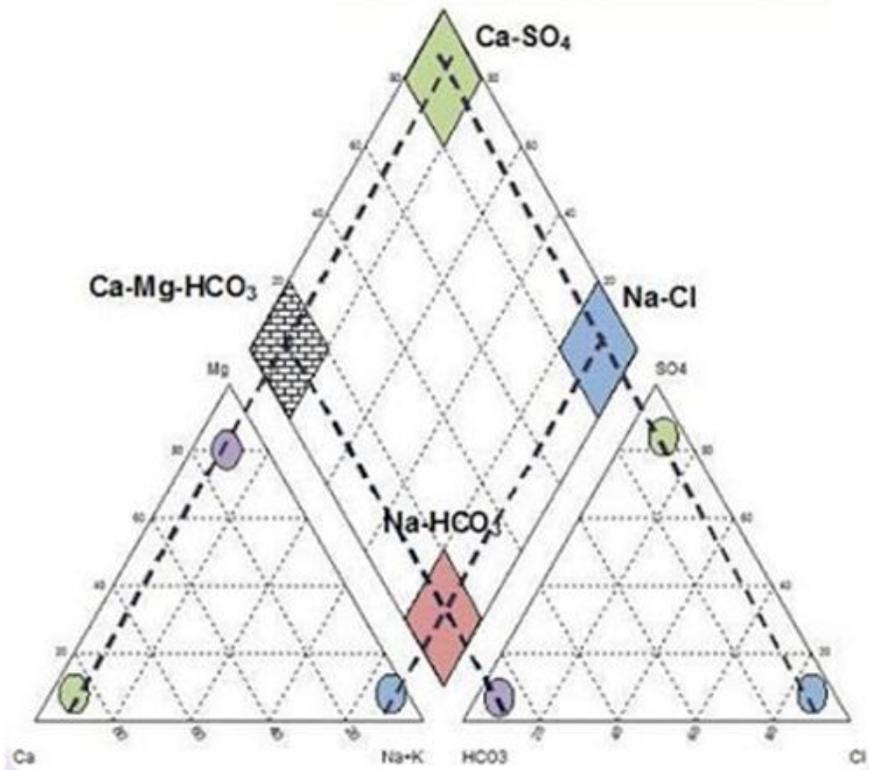
- Visualizar la evolución geoquímica de las aguas subterráneas.
- Detectar procesos como intercambio catiónico.
- Detectar mezclas entre dos tipos de agua.
- Detectar procesos de dilución o precipitación de especies iónicas.
- Junto con la cartografía y localización de los puntos de muestreo permite validar o lanzar hipótesis de la localización de la zona de recarga de los acuíferos.

A continuación se presentan algunos tipos de agua, su clasificación y los procesos o rocas relacionados con los mismos:

Figura 2. Tipos de agua y su clasificación



Continuación figura 2.



Fuente: *Clasificación de aguas*. <http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>. 2002-. Consulta: 14 de agosto de 2012.

Para interpretar el diagrama con más detalle, debe considerarse que para su construcción es necesario que los iones estén reducidos a porcentaje de miliequivalentes por litro (meq/L). A cada vértice de un triángulo le corresponde el 100 % de un catión o un anión.

2.2.3. Criterios para la selección de iones

Existen distintas variantes de estos diagramas. Un detalle importante es la necesidad de eliminar un ion del análisis, debido a la dependencia lineal explícita que surge de la ecuación de balance iónico:



La manera de escoger el ion extra no es única, ya que se pueden seguir diferentes criterios:

- El ion que menor concentración tenga.
- El ion que menor correlación tenga con la conductividad eléctrica (CE); y otros más complejos.
- Entre los iones que mayor correlación tengan entre ellos o el que menor correlación tenga con la conductividad eléctrica (CE).

2.2.4. Construcción del diagrama de Piper

Para construir uno de estos diagramas debe realizarse un meticuloso proceso.

2.2.4.1. Pasos

- Paso No.1: si las concentraciones están en mg/l, se convierten a meq/L dividiendo los mg/L de cada parámetro por el peso del miliequivalente correspondiente.
- Paso No.2: se expresan como porcentaje los meq/L de cada parámetro, para ello: primero, se suman los aniones y los cationes presentes en la muestra; segundo, se divide la concentración de cada parámetro por la suma de aniones o cationes según corresponda.
- Paso No.3: dibujar las proporciones en los gráficos triangulares. Se debe tener en cuenta que estos triángulos muestran solo las proporciones entre los aniones o los cationes mayores, no sus concentraciones.

- Paso No.4: lo que sigue es proyectar ambos puntos en el rombo central. Donde se corten dichas líneas se localiza el punto que caracteriza la muestra, la cual se puede clasificar.

Nota: existe software que realiza todo este procedimiento, por ejemplo Aquache y Digrammes.

2.3. Zonas industriales de la Ciudad de Guatemala

Son zonas especialmente industriales que, en contraste con la normativa de 1971, donde un tercio del área urbanizada era considerada de tolerancia industrial, ahora se concentran en únicamente tres agrupaciones: en el sector Atanasio zona 12, el sector Carretera al Atlántico zonas 17 y 18 y, como nueva zona industrial, el sector Periférico Metropolitano zona 25. Con esto se prevé el desarrollo urbano ordenado a lo largo de esta nueva vialidad de importancia nacional. En suma, las zonas industriales corresponden a un 5,6 % del área urbanizada actual, que resulta en un balance más adecuado a un municipio mucho más dedicado a otros sectores económicos.

2.4. Iones de interés en clasificación del agua

Un ion es una subpartícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutra. Los iones cargados negativamente, producidos por haber más electrones que protones, se conocen como aniones, y los cargados positivamente, consecuencia de una pérdida de electrones, se conocen como cationes. Un ion conformado por un solo átomo se denomina ion monoatómico, a diferencia de uno conformado por dos o más átomos, que se denomina ion poliatómico.

Los iones utilizados en el diagrama son seis, parámetros cada uno de ellos para cada vértice del triángulo, y en algunas ocasiones se unen iones, ya sea por las concentraciones o tipos de iones, ya porque son muy semejantes. Los iones utilizados son: HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} y $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$.

Algunos componentes son muy poco reactivos químicamente y su concentración en el agua subterránea solo se modifica a causa de unos pocos procesos físicos, como mezclas entre aguas distintas o evaporación. A estos componentes se les llama “conservativos”. Si se conocen razonablemente los procesos físicos y químicos que afectan tanto a los componentes reactivos como a los conservativos, las concentraciones de estos se pueden utilizar para cuantificar esos u otros procesos hidrogeológicos.

2.5. Evaluación del potencial industrial de aguas subterráneas

Las aguas subterráneas constituyen un recurso vital para el desarrollo, puesto que, en varias regiones de Guatemala, durante el verano se secan algunas fuentes superficiales de agua que se utilizan con fines de consumo humano, industrial y riego agrícola. En la metodología a utilizar se deben integrar los factores principales que pueden incidir notablemente en el potencial de aguas subterráneas.

Para poder realizar el análisis del potencial se deben crear capas temáticas. Las capas son lineamientos estructurales y de distribución. Entre algunos ejemplos de capas se encuentran: estructuras geológicas, densidad de rasgos kársticos, densidad de drenaje fluvial, tipo de roca, balance y cuerpos de agua.

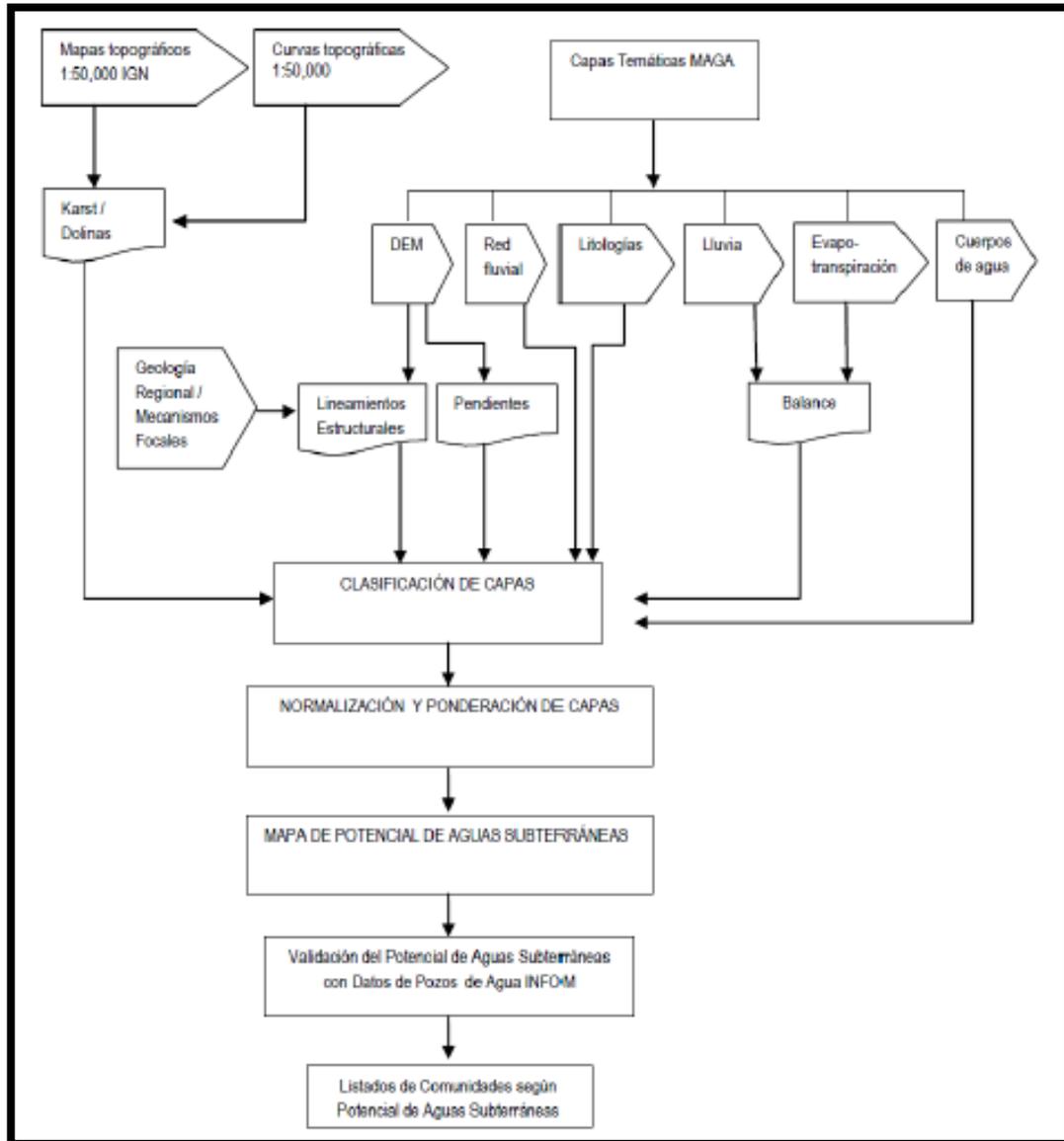
2.5.1. Integración de factores

Los diferentes tipos de rocas, los lineamientos estructurales y la geomorfología fueron tomados en consideración como los factores principales que controlan la circulación y almacenamiento de agua subterránea. Se considera que las litologías constituyen en factor principal, ya que las propiedades físicas de los distintos tipos de rocas son una evidencia indirecta que definen si un área tiene potencial de agua subterránea bajo, medio o alto.

La geomorfología fue considerada como el segundo factor de importancia debido a que el hecho de la infiltración del agua en el terreno depende de los tipos de suelos y sedimentos, relieve y vegetación, los cuales pueden de alguna manera aproximarse con el paisaje. Los lineamientos estructurales constituyen el tercer factor de importancia que controla la circulación y almacenamiento de agua subterránea, aunque en terrenos cristalinos puede considerarse un factor de extrema relevancia.

En la página siguiente se muestra un diagrama útil para entender la metodología con la que se evalúa el potencial de aguas subterráneas en Guatemala.

Figura 3. Metodología utilizada para la evaluación del potencial de aguas subterráneas de Guatemala



Fuente: Sonitec-VortisandInc. *Potencial de aguas subterráneas*.

<http://www.sonitec.com/en/home.html>. Consulta: 14 de agosto de 2012

Figura 4. Mapa de potencial de aguas subterráneas de Guatemala



Fuente: Sonitec-VortisandInc. *Mapa de potencial de aguas.*

<http://www.sonitec.com/en/home.html>. Consulta: 14 de agosto de 2012.

2.6. Marco legal e instituciones relacionadas

Deben tomarse en cuenta, también, algunos aspectos legales.

2.6.1. Marco Legal

Entre los aspectos legales establecidos para el régimen y control de aguas subterráneas se encuentran:

2.6.1.1. Constitución Política de la República

Sobre las aguas subterráneas, se pueden citar los siguientes artículos:

Artículo 121. Bienes del Estado. Son bienes del Estado: a) los de dominio público; b) las aguas de la zona marítima que ciñe las costas de su territorio, los lagos, ríos navegables y sus riberas, los ríos, vertientes y arroyos que sirvan de límite internacional de la República, las caídas y nacimientos de agua de aprovechamiento hidroeléctrico, las aguas subterráneas y otras que sean susceptibles de regulación por la ley y las aguas no aprovechadas por particulares en la extensión y término que fije la ley;

Artículo 127. Régimen de aguas. Todas las aguas son de bienes de dominio público, inalienables e imprescriptibles. Su aprovechamiento, uso y goce, se otorgan en la forma establecida por la ley, de acuerdo con el interés social. Una ley específica regulará esta materia.

Artículo 128. Aprovechamiento de aguas, lagos y ríos. El aprovechamiento de las aguas de los lagos y de los ríos, para fines agrícolas, agropecuarios, turísticos o de cualquier otra naturaleza, que contribuya al desarrollo de la economía nacional, está al servicio de la comunidad y no de persona particular alguna, pero los usuarios están obligados a reforestar las riberas y los cauces correspondientes, así como a facilitar las vías de acceso⁴.

⁴ Estado de Guatemala. *Constitución Política de la República de Guatemala*. Reformada por Acuerdo legislativo No. 18-93 del 17 de noviembre de 1993. Págs. 26-28.

2.6.1.2. Código Civil

El Código Civil atiende la cuestión del recurso acuático en su capítulo V, Sobre la propiedad de las aguas, en el cual se examinan, entre otros aspectos, los siguientes:

Artículo 579. Aguas de dominio privado. Son de dominio privado: a) las aguas pluviales que caigan en predios de propiedad privada, mientras no traspasen sus linderos; b) las aguas continuas y discontinuas que nazcan en dichos predios, mientras discurren por ellos; c) las lagunas y sus álveos formados por la naturaleza, en los expresados terrenos; y d) las aguas subterráneas obtenidas por medios artificiales en propiedades particulares.

Artículo 581. Aguas subterráneas. Todo propietario puede abrir pozos dentro de sus fincas, para obtener y elevar aguas subterráneas, y efectuar cualquier otra obra con el objeto de buscar el alumbramiento de dichas aguas, pero sin que tales trabajos puedan mermar o distraer aguas públicas o privadas de su corriente superficial natural, que se destinan a un servicio público o a un aprovechamiento particular preexistente, con título legítimo, en cuyo caso, la autoridad, a solicitud de los interesados, podrá ordenar la suspensión de la obra.

Artículo 582. Distancias a que pueden abrirse los pozos. Las obras artificiales a que se refiere el artículo anterior no podrán ejecutarse a menor distancia de cuarenta metros de edificios ajenos, de un ferrocarril o carretera, ni a menos de cien metros de otro alumbramiento o fuente, río , canal, acequia o abrevadero público, sin la licencia correspondiente de los dueños o, en su caso, del municipio.

Artículo 583. Los pozos no deberán perforarse a menor distancia de dos metros entre uno y otro dentro de las poblaciones, y de quince metros por lo menos, en el campo.

Artículo 588. Todo lo relativo al uso, aprovechamiento y disfrute de las aguas públicas y particulares, se regirá por las disposiciones de las leyes agrarias o de la ley especial del régimen de aguas y regadíos⁵.

De los artículos anteriormente citados, es importante resaltar que de acuerdo con el artículo 127 de la Constitución, el régimen de aguas estará regulado por una ley específica. De dicha ley se cuenta hasta el momento con el proyecto, que actualmente está en proceso de análisis en el Congreso de la República. Sin embargo, y no menos importante, es que el manejo de las aguas subterráneas tendría que apegarse a las disposiciones de las leyes agrarias o a la Ley Especial del Régimen de Aguas y Regadíos, según el artículo 588 del Código Civil. Es notable que, a diferencia de la Constitución Política de la República, el Código Civil trate el tema de la propiedad de las aguas, estableciendo cuáles son las aguas de dominio privado.

2.6.2. Instituciones relacionadas

Según la Ley del Organismo Ejecutivo, las instituciones relacionadas a la cuestión del agua en Guatemala son:

Artículo 30. Ministerio de Comunicaciones, Transporte, Obras Públicas y Vivienda. Al Ministerio de Comunicaciones, Transporte, Obras Públicas y Vivienda le corresponde formular las políticas y hacer cumplir el régimen jurídico aplicable al establecimiento, mantenimiento y desarrollo de sistemas de comunicaciones y transporte del país; al uso y aprovechamiento de las frecuencias radioeléctricas y del espacio aéreo; a la obra pública; a los servicios de información de meteorología, vulcanología, sismología e hidrología; y a la política de vivienda y asentamientos humanos⁶.

⁵ Estado de Guatemala. *Código Civil*. Primera Edición 2010. Págs. 745-747.

⁶ Organismo Ejecutivo. *Ley del Organismo Ejecutivo*. Decreto 114-97. Pág.30

Es decir que, entre sus atribuciones, le corresponde formular las políticas y hacer cumplir el régimen jurídico aplicable, entre otras áreas, a los servicios de información de meteorología, vulcanología, sismología e hidrología. Específicamente en el inciso g) se indica que tiene a su cargo: "velar por que se presten en forma descentralizada los servicios de información de meteorología, vulcanología, sismología e hidrología"⁷. Esto lo realiza a través del Insivumeh, institución creada a través del acuerdo gubernativo sin número del 26 de marzo de 1976 y publicado el 29 de marzo del mismo año.

A nivel metropolitano, es la Empresa Municipal de Agua (Empagua) la institución a cargo del manejo y distribución del agua desde su creación, a través del acuerdo gubernativo de fecha 25 de mayo de 1,971. Dentro de la estructura orgánica de Empagua, la gerencia decide las acciones y funciones de la empresa, e impulsa, dirige y coordina las actividades técnicas y operacionales del suministro de agua potable y alcantarillado. Para el mejor desempeño de sus funciones cuenta con las siguientes asesorías: asesoría de gerencia, auditoría interna y asesoría legal, la cual es de especial interés para este trabajo de investigación, ya que tiene a su cargo el dictamen y emisión de opiniones en asuntos de su competencia, que se encuentran enmarcados en derecho y a su vez defiende los intereses de la empresa en materia jurídica.

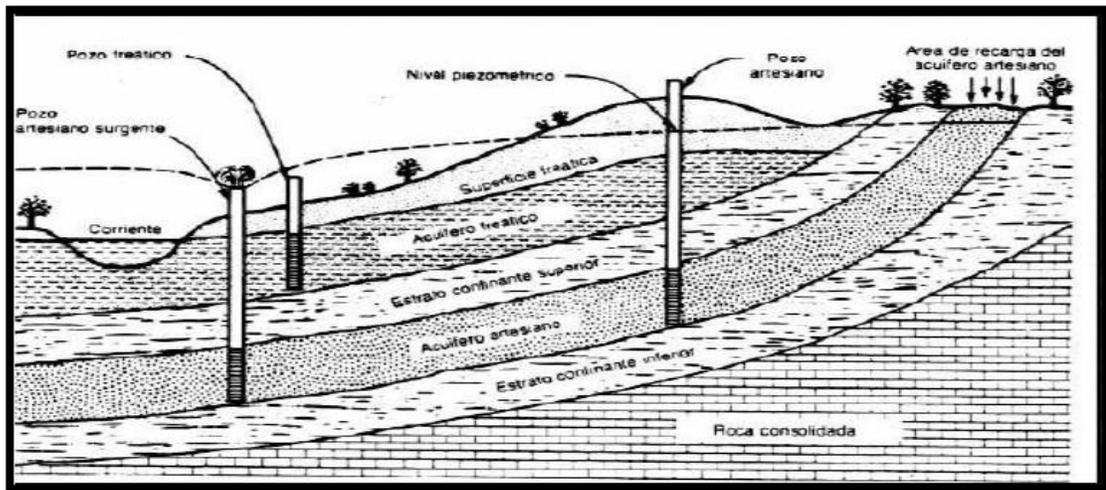
2.7. Dirección de agua freática

Agua freática es el agua subterránea acumulada que se encuentra a una profundidad pequeña bajo el nivel del suelo. La distancia bajo el nivel del suelo

⁷ Organismo Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. *Instituto Nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología*. República de Guatemala. [en línea]. http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Clima.htm. [Consulta: 4 de octubre de 2016].

es la que muestra la diferencia entre agua freática y acuífero, dado que el acuífero está localizado a mayor profundidad.

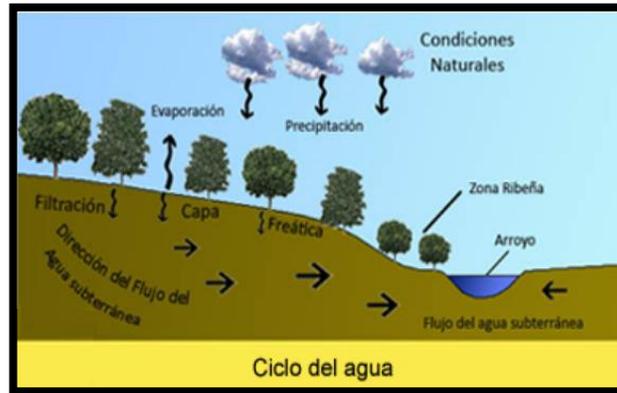
Figura 5. Agua subterránea y pozos



Fuente: MONTENEGRO, Edgar. *Estudio de aguas subterráneas*. p. 2.

El flujo del agua subterránea según el sistema hidrológico es considerado de forma horizontal y normalmente es un sistema estático. Se considera estático cuando es equivalente a un medio granular con propiedades iguales en todas las direcciones. Por otro lado, considerarlo dinámico se da cuando se escavan pozos debido a que existe un flujo vertical, que es un comportamiento natural en las zonas de extracción. En los pozos se pueden determinar dos zonas debido al movimiento del agua, la cual se denomina recarga (hacia abajo) y descarga (hacia arriba). En el ciclo hidrológico del agua, la recarga es debida a la precipitación pluvial y el agua que fluye hacia los arroyos.

Figura 6. **Ciclo hidrológico del agua**



Fuente: PERLMAN, H. *La ciencia del agua para las escuelas*.
<http://water.usgs.gov/gotita/earthgwdecline.html>. Consulta: 2015.

En los pozos, el agua que es bombeada causa que la capa freática baje de nivel y cambie de dirección de la corriente del agua subterránea, como se muestra en la imagen de la siguiente página.

Figura 7. **Dirección del agua freática cuando se perfora un pozo**

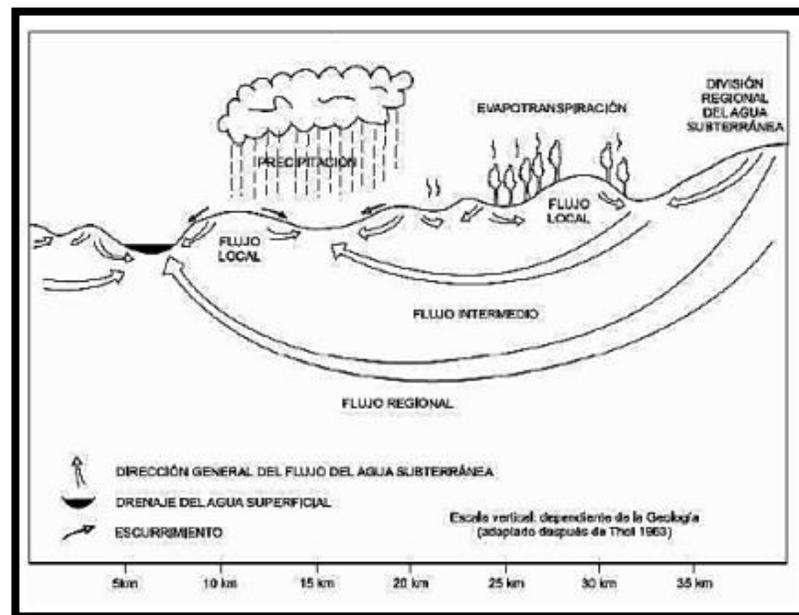


Fuente: PERLMAN, H. *La ciencia del agua para las escuelas*.
<http://water.usgs.gov/gotita/earthgwdecline.html>. Consulta: 2015.

Se pueden diferenciar tres sistemas de flujo de agua. Estos se establecen de acuerdo con la topografía el marco geológico presente.

- Local: en cada topografía el agua entra y sale en el mismo valle.
- Intermedio: parte del agua de recarga podrá descargar en otro valle localizado a un nivel topográfico menor.
- Regionales: se desarrollan a mayor profundidad y van de las partes más altas a las zonas de descarga más bajas de la cuenca.

Figura 8. Flujo de agua subterránea



Fuente: MADEREY RASCÓN, Laura Elena. *Principio de Hidrogeografía. Estudio del ciclo Hidrológico*. p. 93.

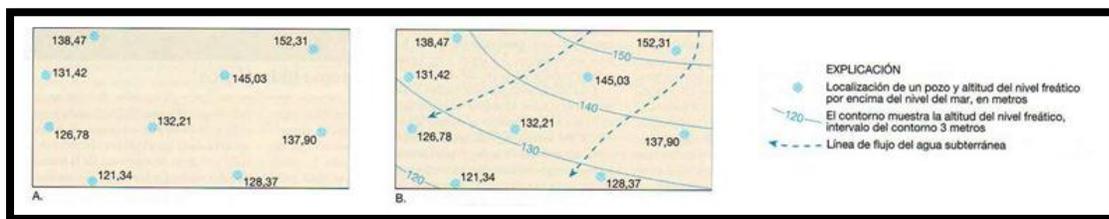
La presencia y el movimiento del agua subterránea están condicionados a ciertos factores, entre los que tienen mayor relevancia la precipitación, la

forma del terreno, la geología y la presencia o ausencia de vegetación. El agua subterránea se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados (debido a la gravedad) y eventualmente llegan a los arroyos, los lagos y los océanos.

Es una creencia común que el agua subterránea llena cavidades y circula por galerías. Sin embargo, no siempre es así, pues puede encontrarse ocupando los intersticios (poros y grietas) del suelo, del sustrato rocoso o del sedimento sin consolidar, los cuales la contienen como una esponja. La única excepción significativa la ofrecen las rocas solubles, como las calizas y los yesos, susceptibles de sufrir el proceso llamado karstificación, en el que el agua excava simas, cavernas y otras vías de circulación, modelo que más se ajusta a la creencia popular.

Las direcciones de agua subterránea en el departamento de Guatemala están dirigidas hacia donde se encuentran los ríos y estos a su vez hacia donde finalizan los mismos.

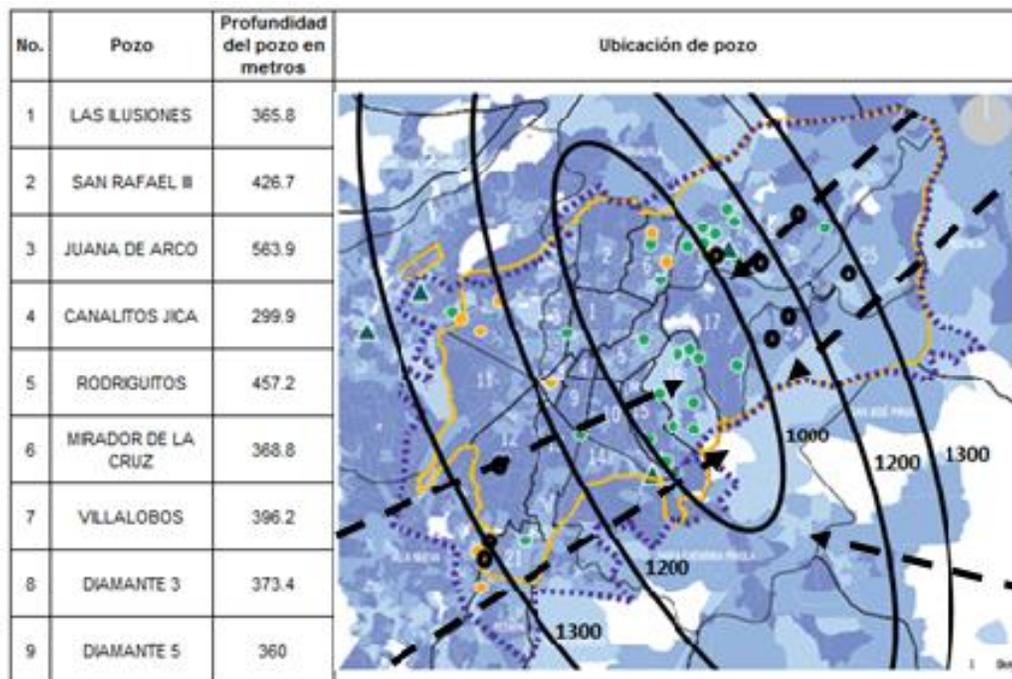
Figura 9. **Dirección de aguas subterráneas**



Fuente: EDWARD, J. Tarbuck; LUTGENS, Frederick K. *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. Octava Edición. p. 483.

En la preparación de un mapa de nivel freático, el nivel del agua de los pozos coincide con este. En primer lugar, se sitúan en un mapa las localizaciones de los pozos y las elevaciones del nivel freático por encima del nivel del mar. En segundo término, estos puntos se utilizan para trazar las líneas de flujo de aguas subterráneas; pueden añadirse para mostrar el movimiento del agua en la parte de la zona de saturación. El agua subterránea tiende a moverse más o menos perpendicular a los contornos, descendiendo por la pendiente del nivel freático. No obstante, en época de mucha sequía, el nivel freático puede descender lo suficiente como para secar los pozos poco profundos.

Figura 10. **Dirección de aguas subterráneas en el departamento de Guatemala**

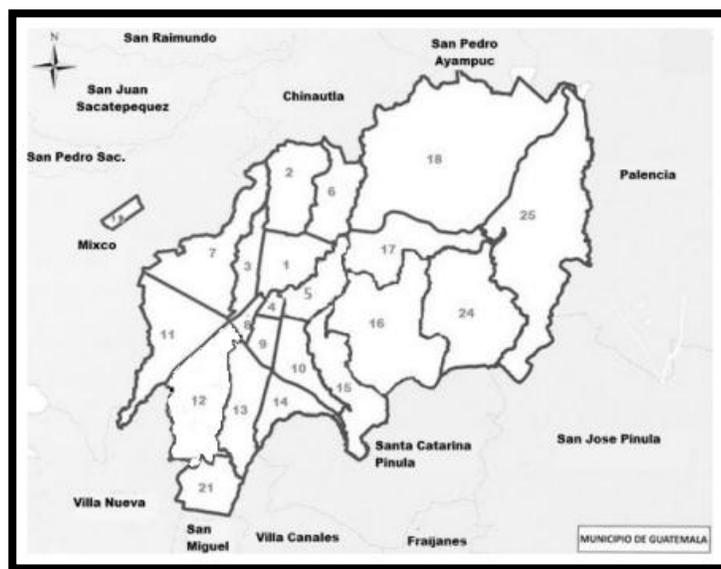


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2.8. Caracterización de zona industrial

Guatemala cuenta con 340 municipios, su capital está en el departamento de Guatemala. Tiene una extensión de 228 km cuadrados, está conformado por siete aldeas, una ciudad y veinte caseríos. El clima que predomina es templado. La ciudad capital fue fundada el 2 de enero de 1776, en lo que era denominado como Valle de la Ermita.

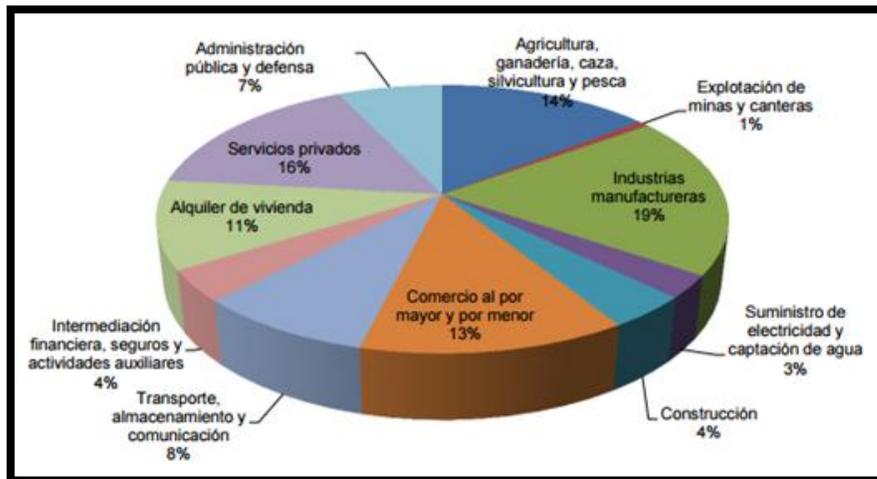
Figura 11. Aldeas que limitan al municipio de Guatemala



Fuente: MADEREY RASCÓN, Laura Elena. *Principio de Hidrogeografía. Estudio del ciclo Hidrológico*. p. 93.

El comercio interno aporta datos importantes sobre el departamento, debido a que muestra a nivel general el enfoque del sector industrial. En Guatemala existen un total de 195 220 empresas y locales. El 41,1 % se encuentran en el departamento de Guatemala.

Figura 12. Giro de empresas ubicadas en Guatemala



Fuente: Equipo Nacional GEM Guatemala. *Reporte nacional, el comercio interno de Guatemala*. <http://water.usgs.gov/gotita/earthgwdecline.html>. Consulta: 2016.

2.9. Clasificación de las empresas según la actividad que desarrollan

- Industriales: se encargan de la producción de bienes mediante la transformación o extracción de materias primas, las cuales pueden ser extractivas, manufactureras o agropecuarias.
- Comerciales: intermediarios entre el productor y el consumidor, es decir la compra-venta de productos, las cuales pueden ser mayoristas, menudeo, minoristas o detallistas y comisionistas.
- Servicios: brindan servicio a la comunidad y pueden tener o no fines lucrativos. Pueden clasificarse en servicios públicos varios (tal como comunicaciones, energía, agua), servicios privados varios (contables, jurídicos, administrativos, entre otros), transporte (colectivo o mercadería), turismo, educación, seguridad, salubridad (hospitales), finanzas y seguros.

De acuerdo a la cantidad de empresas dedicadas al mismo giro de negocio se procedió a realizar la clasificación de caracterización de la zona industrial.

Tabla VIII. **Clasificación de las empresas localizadas en las zonas 24 y 25**

NOMBRE	GIRO INDUSTRIAL	ZONA	CLASIFICACIÓN DE LA ZONA
Calera del norte	Industrial	24	Industrial
Pisos el Aguila	Industrial		
Polar Cool Car	Comercial		
Avicula Fatima	Industrial	25	Industrial
Arrocera San Francisco SA	Industrial		
Transportes Cuevas	Servicio		
Z Gas- Atlántico	Servicio		

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Clasificación de las empresas localizadas en las zonas 17 y 18**

NOMBRE	GIRO INDUSTRIAL	ZONA	CLASIFICACIÓN DE LA ZONA
Almacenadora de Servicios	Comercial	17	Industrial
Bodegas DHL / Jhonson & Jhonson	Servicio		
Café Incasa	Industrial		
Embutidos Bremen	Industrial		
Constructora Codico	Industrial		
Inmaco	Industrial		
Red Ecologica	Industrial		
Bodegas Atlantico	Comercial		
Da Gas	Servicio		
Pepsi Norte	Servicio		
Tecnifibras	Industrial		
Claro	Servicio		
Industria de Ganaderos Exguapagra	Industrial		
AMR Producciones SA	Servicio		
Inductrias alimenticas Kern´s y CIA SA	Industrial		
Papelera Internacional SA	Industrial		
Corporación Lancasco	Industrial		
Grupo Rio Vinyl	Industrial		
Multimateriales	Industrial		
Rollos y Mas, papelería	Industrial		
La Roca	Industrial		
Perfiles del Norte	Industrial		
Internacional de Guatemala	Industrial		
Transportes Pineda Rossell SA	Servicio		
Sucursal Coca Cola	Servicio		
Keenworh de Centro America	Industrial		
Prodin	Industrial		
Tragirsa	Servicio		
Bits Developmente	Servicio		

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Clasificación de las empresas localizadas en la zona 12

NOMBRE	GIRO INDUSTRIAL	ZONA	CLASIFICACIÓN DE LA ZONA
Aceros Suarez SA	Industrial	12	Industrial
CBC	Industrial		
DHL Global Forwarding	Industrial		
Bac - Credomatic	Servicio		
Aceros Prefabricados SA	Industrial		
Café Quetzal	Industrial		
Café Leon SA	Industrial		
División Industrial Pecuaria	Industrial		
Dunkin Donuts	Industrial		
Amanco	Industrial		
Clariant	Industrial		
Gas Wackenhut	Industrial		
Grupo Coban	Industrial		
Grupo Cobra	Industrial		
Grupo Lala	Industrial		
Helps International	Servicio		
Guatex	Servicio		
Intertek	Servicio		
Ix Chebel SA	Industrial		
Malher SA	Industrial		
Kimberly Clark	Industrial		
Pades Centro Dos SA	Industrial		
Peseresa	Industrial		
Proval SA	Servicio		
Seneca	Industrial		
Serlogic SA	Industrial		
La torre y Econosuper	Comercial		
Sur Color SA	Industrial		
Ventas Unidas SA	Industrial		
Vidriera Guatemalteca SA	Industrial		

Fuente: elaboración propia.

2.10. Distancia del pozo a zona industrial

La distancia del pozo a la zona industrial puede ser un factor clave en la contaminación del pozo, por eso se realiza la siguiente tabla, donde se identifica la distancia en kilómetros.

Tabla XI. **Distancia del pozo a zona industrial, zonas 24 y 25, en km.**

NOMBRE DE LA INDUSTRIA	POZO	CANALITOS JICA	RODRIGUITOS	MIRADOR DE LA CRUZ
Calera del norte	24	6,1	5,5	12,1
Pisos el Águila		8,1	3,5	10,1
Polar Cool Car		3,5	5,2	6,6
Avícula Fátima	25	4,7	6,2	7,6
Arrocera San Francisco SA		12,1	13,1	8,8
Transportes Cuevas		7,1	2,3	5,8
Z Gas-Atlántico		17,1	11,5	7,2
PROMEDIO	24 Y 25	8,4	6,8	8,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Distancia del pozo a zona industrial, zonas 17 y 18, en km.**

NOMBRE DE LA INDUSTRIA	POZO	LAS ILUSIONES	SAN RAFAEL III	JUANA DE ARCO
Almacenadora de Servicios	17	5	5,6	0,55
Bodegas DHL / Jhonson & Jhonson		5	5,6	1,5
Café Incasa		7,1	3,3	5
Embutidos Bremen		5	5,6	1,5
Constructora Codico		5	5,6	1,5
Inmaco		6	6	2,5
Red Ecológica		6	0,15	1,8
Bodegas Atlántico		5	5,6	0,55
Da Gas		8	8,5	4,5
Pepsi Norte		6,2	6,5	2,5
Tecnifibras		5	5,6	0,55
Claro		5	5,6	0,55
Industria de Ganaderos Exguapagra		6,1	5,4	2,5
AMR Producciones SA		5	5,6	1,5
Inductrias alimenticas Kern´s y CIA SA		5	5,6	1,5
Papelera Internacional SA		9,5	6,9	6
Corporación Lancasco		18	5	5,6
Grupo Rio Vinyl	5		5,6	1,5
Multimateriales	6,3		6	6,3
Rollos y Más, papelería	6,1		3,6	2,7
La Roca	5,9		6,3	1,7
Perfiles del Norte	5		3,8	2,4
Internacional de Guatemala	9,5		6,9	6
Transportes Pineda Rossell SA	6,3		5,2	6,3
Sucursal Coca Cola	5,3		6	1,4
Keenworh de Centro América	5,3		6	1,4
Prodin	5,4		5,9	1,5
Tragirsa	5,4		5,9	1,5
Bits Developmente	5		5,6	0,5
PROMEDIO	17 Y 18	5,8	5,5	2,4

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Distancia del pozo a zona industrial, zona 12, en km.**

NOMBRE DE LA INDUSTRIA	POZO	VILLALOBOS	DIAMANTE 3	DIAMANTE 5
Aceros Suárez SA	12	2,3	6,2	7,0
CBC		5,7	9,6	10,4
DHL Global Forwarding		3,9	7,8	8,6
Bac - Credomatic		5,9	9,8	10,6
Aceros Prefabricados SA		3,4	7,3	8,1
Café Quetzal		0,4	4,3	5,1
Café León SA		2,5	6,4	7,1
División Industrial Pecuaria		3,2	7,1	7,8
Dunkin Donuts		6,4	10,3	11,0
Amanco		4,4	8,3	9,0
Clariant		3,2	7,1	7,8
Gas Wackenhut		0,2	3,7	4,5
Grupo Coban		4,0	7,9	8,7
Grupo Cobra		0,2	3,7	4,4
Grupo Lala		0,8	4,7	5,4
Helps International		3,7	7,6	8,3
Guatex		4,8	8,7	9,5
Intertek		0,8	4,7	5,4
Ix Chebel SA		0,3	3,6	4,3
Malher SA		2,7	6,6	7,4
Kimberly Clark		0,4	4,3	5,1
Pades Centro Dos SA		1,9	5,8	6,6
Peseresas		3,1	7,0	7,8
Proval SA		1,6	5,5	6,3
Seneca		8,4	12,3	13,1
Serlogic SA		5,6	9,5	10,3
La torre y Econosuper		9,7	13,6	14,4
Sur Color SA		3,6	7,5	8,2
Ventas Unidas SA		0,2	3,7	4,4
Vidriera Guatemalteca SA		7,1	11,0	11,8
PROMEDIO	12	3,4	7,2	8,0

Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Determinación de los parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos necesarios para el balance iónico y la construcción del diagrama de Piper son: bicarbonato (HCO_3^-), cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+).

3.2. Variables

En las siguientes tablas se muestran las variables incidentes en la investigación:

Tabla XIV. Definición de variables independientes

Variable	Descripción	Unidades
Ca^{+2}	Catión calcio	mg/L
Mg^{+2}	Catión magnesio	mg/L
Na^{+1}	Catión sodio	mg/L
K^{+1}	Catión potasio	mg/L
HCO_3^-	Anión bicarbonato	mg/L
SO_4^{-2}	Anión sulfato	mg/L
Cl^-	Anión cloruro	mg/L

Fuente: elaboración propia.

3.3. Delimitación del campo de estudio

El estudio se realizó con un método gráfico, para determinar el potencial industrial que posee el agua. Este gráfico se realiza a través de la cuantificación de los iones presentes en el agua.

El estudio se realizó con datos obtenidos en años anteriores en el laboratorio, para poderse llevar a cabo de forma retrospectiva (2013 al 2015). Se limitó únicamente a la jurisdicción de la ciudad de Guatemala, en las zonas industriales.

3.4. Recursos humanos disponibles

Para la realización del trabajo de investigación participó directamente la investigadora, encargada de toda la parte de recolección de datos, así como su asesor, un experto técnico en la materia que aportó sus conocimientos sobre el tema de estudio para llegar a las conclusiones sobre el mismo.

Función	Responsable
Investigadora	Karla Anabella Mis Juárez
Asesor	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
Analista de laboratorio	Según corresponda

3.5. Recursos materiales disponibles

A continuación se presenta un detalle de los recursos materiales utilizados en esta investigación.

3.5.1. Materia prima

El agua de los pozos ubicados en las zonas industriales y los documentos que contengan la cuantificación de los iones de los años anteriores de dichos pozos, para poder elaborar un documento retrospectivo. La base de datos será proporcionada por el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini Molina, de EMPAGUA-ERIS, ubicado en el segundo nivel del edificio T-5 de la USAC.

3.6. Recursos materiales disponibles

Además de los sistemas de filtración a comparar, se cuenta con distintos recursos materiales, desde reactivos y cristalería de laboratorio, hasta bombas de presión y de vapor.

3.6.1. Laboratorios

Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria.

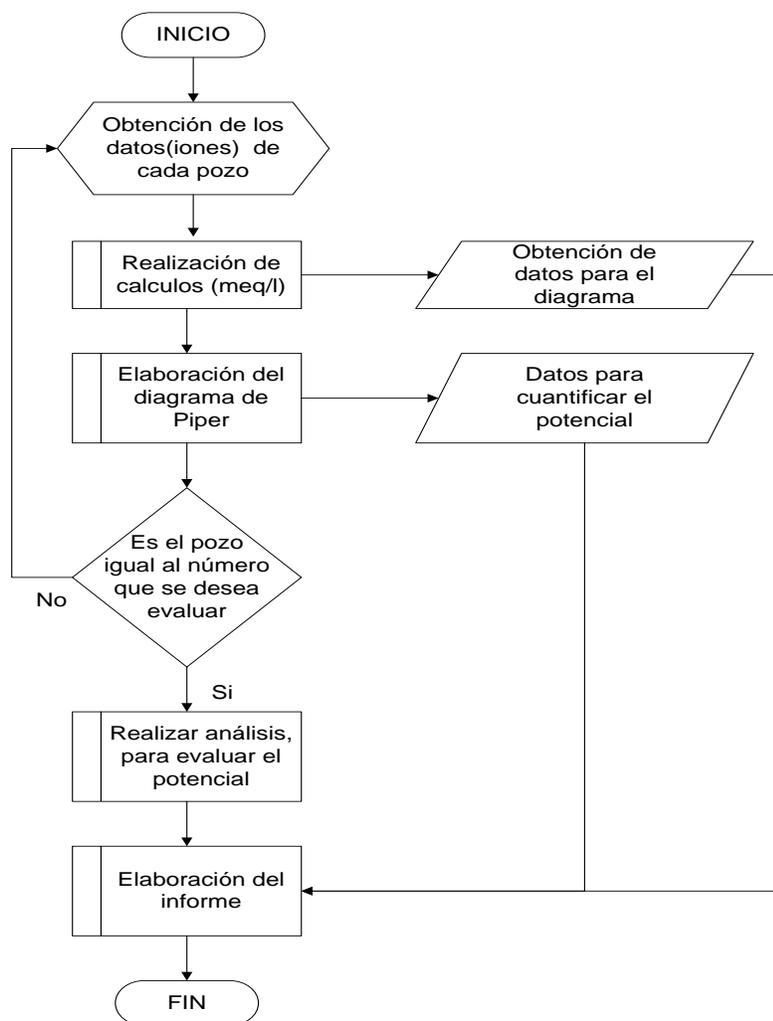
3.7. Técnica de investigación

La técnica de investigación que se utilizará comprende una parte cuantitativa, en la cual se obtendrán datos numéricos que serán graficados en un diagrama triangular para ser analizados e interpretados. Estos datos son los iones presentes en el agua de distintos pozos: Na, Ca, Mg, K, Cl, HCO₃, CO₃ y SO₄.

3.8. Recolección y ordenamiento de la información

Los datos recolectados por el laboratorio y la realización de los análisis fueron tabulados para su posterior manejo. En el siguiente diagrama se muestra el procedimiento para la obtención de datos necesarios para esta investigación:

Figura 13. Diagrama de flujo de proceso



Fuente: elaboración propia.

3.9. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación se encuentran tabulados los iones presentes en los pozos de las zonas estudiadas.

Tabla XV. **Cuantificación de los iones presentes en los pozos de las zonas 17 y 18**

POZO	Fecha	Cloruros mg/L	Carbonato mg/L	Sulfatos mg/L	Dureza mg/L	Sodio mg/L	Potasio mg/L	Calcio mg/L	Magnesio mg/L
RODRIGUITOS	10/07/2013	12,00	80,38	1,00	134,19	17,70	3,80	24,05	18,02
	11/12/2013	9,00	80,26	1,00	133,90	20,20	10,30	13,63	24,31
	22/04/2014	13,00	73,16	4,00	122,14	2,00	0,40	28,06	12,65
	08/10/2014	13,00	81,56	8,00	136,16	3,60	0,50	30,46	14,60
	23/09/2015	7,50	65,98	3,00	110,15	3,80	0,60	22,44	13,15
SAN RAFAEL II	23/02/2013	11,50	98,45	0,08	164,36	0,03	15,90	2,50	38,47
	04/08/2013	16,00	129,88	0,01	216,84	0,00	18,40	7,00	48,50
	27/01/2014	10,50	55,54	0,02	92,73	0,01	2,00	0,20	22,44
	27/01/2014	12,50	128,86	0,02	215,13	0,01	3,60	0,40	52,10
	18/11/2015	12,00	130,86	0,01	218,46	0,01	3,80	0,40	52,91
LAS ILUSIONES	10/03/2013	10,50	94,57	0,10	157,88	0,02	16,50	7,80	33,67
	04/08/2013	14,00	108,99	0,01	181,96	0,00	2,00	0,30	44,09
	27/04/2014	9,00	36,12	0,02	60,31	0,02	3,30	0,40	14,43
	31/08/2014	26,50	87,43	0,05	145,96	0,02	5,70	0,40	35,27
	26/06/2015	14,00	137,79	0,08	230,04	0,03	15,00	2,40	54,51
JUANA DE ARCO	09/10/2013	17,50	88,58	6,60	147,88	0,03	19,20	3,80	33,67
	06/12/2013	7,50	118,43	0,11	197,71	0,02	27,00	6,60	44,09
	22/04/2014	15,00	137,90	0,26	230,21	0,02	24,00	5,10	52,91
	08/10/2014	15,00	156,54	0,21	261,34	0,01	36,50	20,20	51,30
	18/11/2015	27,00	67,66	0,01	112,96	14,61	44,09	1,70	26,45

Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria. *Cuantificación de iones.*

FECHA: 2013, 2014 y 2015.

Tabla XVI. **Cuantificación de los iones presentes en los pozos de las zonas 23 y 24**

POZO	Fecha	Cloruros mg/L	Carbonato mg/L	Sulfatos mg/L	Dureza mg/L	Sodio mg/L	Potasio mg/L	Calcio mg/L	Magnesio mg/L
CANALITOS JICA	17/07/2013	14,00	61,20	1,00	102,16	6,40	1,10	16,83	14,62
	11/12/2013	7,50	52,74	1,00	88,05	14,00	8,60	19,24	9,72
	29/04/2014	11,50	40,78	2,00	68,08	1,60	0,30	15,23	7,30
	28/10/2014	14,50	38,37	1,00	64,06	3,10	0,50	14,43	6,81
	26/05/2015	7,00	49,11	1,00	81,98	3,00	0,50	16,83	9,71
MIRADOR DE LA CRUZ	24/10/2013	15,00	136,76	6,00	228,31	12,80	2,70	40,08	31,17
	11/12/2013	10,00	134,25	4,00	224,12	11,10	2,70	53,71	21,86
	22/04/2014	17,50	130,76	8,00	218,30	0,00	3,10	35,27	31,66
	08/10/2014	10,00	135,59	3,00	226,35	14,00	8,60	35,27	33,62
	23/09/2015	10,50	149,44	8,00	249,48	1,60	0,30	56,11	26,57
	03/11/2015	12,00	158,19	7,00	264,08	3,10	0,50	55,31	30,61

Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria. *Cuantificación de iones.*

FECHA: 2013, 2014 y 2015.

Tabla XVII. **Cuantificación de los iones presentes en los pozos de la zona 12**

POZO	Fecha	Cloruros mg/L	Carbonato mg/L	Sulfatos mg/L	Dureza mg/L	Sodio mg/L	Potasio mg/L	Calcio mg/L	Magnesio mg/L
VILLA LOBOS	15/05/2013	22,50	64,78	30,00	108,15	8,20	2,60	19,24	14,61
	19/09/2013	19,50	52,72	36,00	88,02	2,10	0,60	20,84	8,74
	08/04/2014	15,00	58,76	25,00	98,10	4,00	0,60	22,44	10,20
	04/11/2014	31,00	58,14	27,00	97,07	3,80	0,30	25,10	8,35
	07/07/2015	19,00	68,38	27,00	114,16	3,70	0,30	20,84	15,10
	29/10/2015	17,50	77,98	27,00	130,18	2,90	0,60	21,64	18,51
DIAMANTE 3	24/10/2013	22,50	119,88	18,00	200,14	26,00	2,70	44,89	21,39
	19/06/2013	22,50	134,17	13,00	223,99	26,50	2,60	48,10	25,24
	21/08/2014	14,50	86,25	7,00	143,99	24,50	2,50	32,87	15,04
	14/04/2014	32,00	135,60	14,00	226,37	29,30	17,20	30,60	36,55
	12/02/2015	29,50	151,14	16,00	252,32	26,50	2,60	49,70	31,16
DIAMANTE 5	19/06/2013	12,50	99,40	13,00	166,02	25,50	2,50	37,67	17,48
	24/10/2014	20,00	116,19	35,00	193,98	28,60	3,30	38,48	23,79
	21/08/2014	12,50	94,64	13,00	157,99	26,50	2,50	36,07	16,50
	12/08/2015	37,00	165,56	44,00	276,39	26,00	2,70	45,70	39,45

Fuente: Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria. *Cuantificación de iones.*

FECHA: 2013, 2014 y 2015.

3.10. Análisis estadístico

Debido a que los resultados deben ser precisos, exactos y satisfactorios, se intenta disminuir los errores, utilizando un número adecuado de corridas para evaluar el fenómeno.

3.10.1. Determinación del número de repeticiones

Para determinar el número de repeticiones se asume una distribución normal, donde se utiliza una confiabilidad de 1,96 y una probabilidad de éxito de 95 %, por lo que la probabilidad de fracaso es 5 % y un error estimado de 25 %.

$$n = \frac{p * q * z_{\alpha/2}^2}{e^2}$$

[Ecuación No.1]

donde:

- n = Número de corridas
- $z_{\alpha/2}$ = Confiabilidad
- p = Probabilidad de éxito
- q = Probabilidad de fracaso
- e = Error estimado

Sustituyendo datos en la ecuación No.1 con los datos anteriores se obtiene lo siguiente:

$$n = \frac{p * q * z_{\alpha/2}^2}{e^2} = \frac{0,95 * 0,05 * 1,96^2}{0,25^2} = 2,92 \approx 3$$

Por lo tanto, el diseño experimental exige realizar tres repeticiones, es decir utilizar por lo menos tres pozos de las zonas industriales, realizando la cuantificación de cada ion tres veces.

3.10.2. Análisis de la cantidad de tratamientos

Para cada componente a determinar se utilizó un análisis de varianza por medio de un diseño unifactorial en un solo sentido completamente aleatorio con una distribución de Fisher, esto debido a que se trataron más de dos niveles. Siendo unifactorial por ser solo aguas de pozos, se tienen siete tratamientos o niveles, en este caso los iones y tres repeticiones (depende de los datos recaudados), es decir el agua de cada pozo. El arreglo matricial es de 3 repeticiones X 7 parámetros y 21 iones para cada pozo; para cada zona se utilizaron 3 pozos, 21 iones X 3 zonas dan como resultado sesenta y tres datos. Los datos se arreglaron como sigue, teniendo en cuenta que se evaluaron 3 zonas, 63 datos X 3 zonas dan como resultado 189 datos:

Tabla XVIII. **Variables para el diseño unifactorial**

Tratamientos	No. De observaciones			Total	Promedio
1	$Y_{1,1}$	$Y_{1,2}$	$Y_{1,3}$	Y_1	y_1
2	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$	$Y_{2,3}$	Y_2	y_2
3	$Y_{3,1}$	$Y_{3,2}$	$Y_{3,3}$	Y_3	y_3
A	$Y_{a,1}$	$Y_{a,2}$	$Y_{a,3}$	Y_a	y_a
				Y	y

Fuente: Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada.

<http://www.iuma.ulpgc.es/~nunez/mastertecnologiastelecomunicacion/Tema3DisenodeExperimentos/doe-5-tratamientos-factoriales.pdf>. Consulta: 14 de agosto de 2012.

donde:

Y_a = Es el total de las observaciones bajo el i-ésimo tratamiento

y = Es el promedio de las observaciones bajo el i-ésimo tratamiento

Y = Es la suma de todas las observaciones

El procedimiento para el diseño consiste en seleccionar una repetición completa del experimento, en este caso a repeticiones, con un solo factor con a niveles. Las observaciones pueden representarse por medio de un modelo estadístico lineal:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, a; \quad j = 1, 2, \dots, N$$

donde:

y_{ij} = observación

μ = media general

τ_i = efecto del tratamiento i -ésimo

ε_{ij} = error aleatorio

Tabla XIX. **Análisis de varianza para el diseño unifactorial**

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media Cuadrática	F_0
Tratamientos	$\sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{N} - \frac{y^2}{aN}$	$a - 1$	$\frac{(SS_{\text{tratamientos}})}{(a - 1)}$	$\frac{(MS_{\text{tratamientos}})}{(MS_E)}$
Error	SS_E (por sustracción)	$N - a$	$\frac{(SS_E)}{(N - a)}$	
Total	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^N y_{ij}^2 - \frac{y^2}{aN}$	$N - 1$		

Fuente: Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada.

<http://www.iuma.ulpgc.es/~nunez/mastertecnologiatelecomunicacion/Tema3DisenodeExperimentos/doe-5-tratamientos-factoriales.pdf>. Consulta: 14 de agosto de 2012.

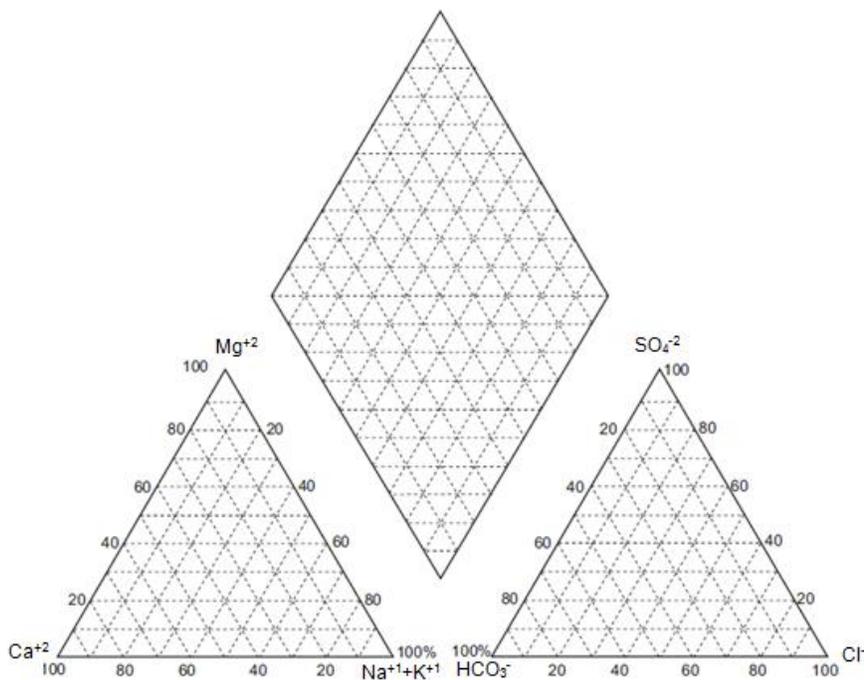
3.11. Plan de análisis de resultados

Se debió trazar un plan para realizar el análisis. Los detalles del mismo se explican a continuación.

3.11.1. Muestra de la construcción del diagrama de Piper

Se utilizó un triángulo para los cationes principales y otro para los aniones.

Figura 14. Ejemplo de diagrama de Piper

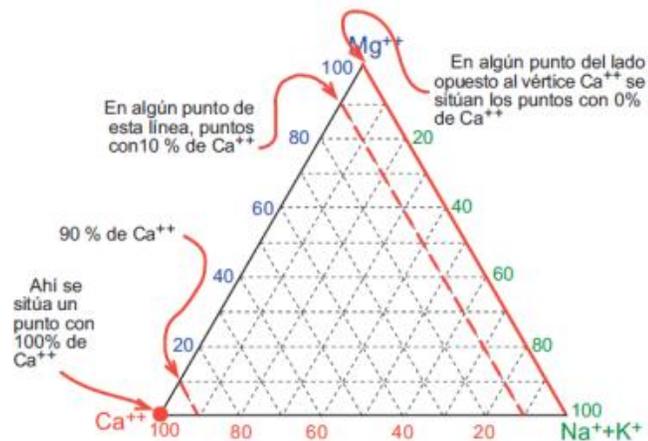


Fuente: *Clasificación de aguas*. http://www.bdh.lapampa.gov.ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos.html. Consulta: 4 de agosto de 2013.

Este es un ejemplo para situar un punto en un triángulo $Ca^{+2} / Mg^{+2} / (Na^{+1}+K^{+1})$. Un vértice representa el 100 % de ese componente. Por el

contrario, los puntos que contengan 0 % de ese componente estarán en el lado opuesto al vértice correspondiente. El vértice Ca^{+2} representa 100 % de Ca^{+2} , mientras que todos los puntos del lado opuesto a ese vértice suponen 0 % de Ca^{+2} :

Figura 15. **Triángulo de cationes**



Fuente: *Clasificación de aguas*. http://www.bdh.lapampa.gov.ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos.html. Consulta: 4 de agosto de 2013.

Debe suponerse una muestra de agua con la composición de cationes mostrada en la tabla de la siguiente página:

Tabla XX. **Composición de cationes y aniones**

No. Pozo	Variable	Descripción	No. Corrida		
			1 (mg/L)	2 (mg/L)	3 (mg/L)
1	Ca^{+2}	Catión calcio	1 630	1 640	1 650
	Mg^{+2}	Catión magnesio	590,39	600,34	595,32
	Na^{+1}	Catión sodio	1 582	1 585	1 594
	K^{+1}	Catión potasio	1 360	1 364	1 371

Continuación tabla XX.

1	HCO ₃ ⁻	Anión bicarbonato	1 652	1 600,34	1 595
	SO ₄ ⁻²	Anión sulfato	2 453	2 585	2 594
	Cl ⁻	Anión cloruro	1 360	1 364	1 371

Fuente: *Clasificación de aguas*. http://www.bdh.lapampa.gov.ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos.html. Consulta: 4 de agosto de 2013.

Se determinan los promedios a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Corrida 1} + \text{Corrida 2} + \text{Corrida 3}}{3}$$

Ejemplo: se determinó el promedio para el ion calcio:

$$Ca^{+2} = \frac{1\,630 + 1\,640 + 1\,650}{3} = 1\,640 \text{ mg/L}$$

En la siguiente tabla se observan todos los resultados:

Tabla XXI. Promedio de los iones

No. Pozo	Variable	No. Corrida			Promedio (mg/L)
		1 (mg/L)	2 (mg/L)	3 (mg/L)	
1	Ca ⁺²	1 630	1 640	1 650	1 640
	Mg ⁺²	590,39	600,34	595,32	595,35
	Na ⁺¹	1 582	1 585	1 594	1 587
	K ⁺¹	1 360	1 364	1 371	1 365
	HCO ₃ ⁻	1 652	1 600,34	1 595	1 615,78
	SO ₄ ⁻²	2 453	2 585	2 594	2 544
	Cl ⁻	1 360	1 364	1 371	1 365

Fuente: *Clasificación de aguas*. http://www.bdh.lapampa.gov.ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos.html. Consulta: 4 de agosto de 2013.

Se determina con concentración en meq/L a partir del peso en meq de cada ion:

$$\text{Concentracion} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{promedio mg/L}}{\text{peso meq}}$$

Ejemplo: se determinó la concentración del calcio en meq/L:

$$Ca^{+2} = \frac{1640 \text{ mg/L}}{82} = 82 \frac{\text{meq}}{\text{L}}$$

En la siguiente tabla se observan todos los resultados:

Tabla XXII. **Concentración de iones en meq/L**

No. Pozo	Variable	Promedio (mg/L)	Peso de un meq	Concentración (meq/L)
1	Ca ⁺²	1 640	20	82
	Mg ⁺²	595,35	12,15	49
	Na ⁺¹	1 587	23	69
	K ⁺¹	1 365	39	35
	HCO ₃ ⁻	1 615,78	61	26
	SO ₄ ⁻²	2 544	35,5	72
	Cl ⁻	1 365	48	28

Fuente: *Clasificación de aguas*. http://www.bdh.lapampa.gov.ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos.html. Consulta: 4 de agosto de 2013.

Los valores de los cationes se suman al igual que los valores de los iones:

$$\sum \text{Cationes} = 82 + 49 + 69 + 35 = 235$$

$$\sum \text{Aniones} = 26 + 72 + 28 = 127$$

A partir de esta suma se determinan los promedios, con la siguiente fórmula:

$$\% = \frac{\text{concentracion del ion meq/L}}{\sum} * 100$$

Ejemplo: se determinó % del calcio:

$$\% Ca^{+2} = \frac{82 \text{ meq/L}}{235} * 100 = 34,9 \%$$

En la siguiente tabla se observan todos los resultados:

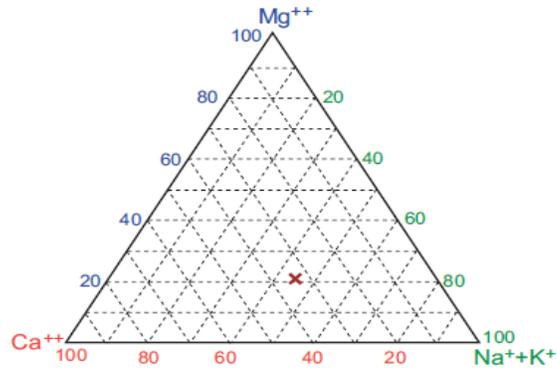
Tabla XXIII. **Concentración de iones en porcentaje**

No. Pozo	Variable	Concentración (meq/L)	Sumatoria	%
1	Ca ⁺²	82	235	34,9
	Mg ⁺²	49		20,9
	Na ⁺¹	69		29,4
	K ⁺¹	35		14,9
	HCO ₃ ⁻	26	127	20,9
	SO ₄ ⁻²	72		56,6
	Cl ⁻	28		22,5

Fuente: *Clasificación de aguas*. http://www.bdh.lapampa.gov.ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos.html. Consulta: 4 de agosto de 2013.

El punto correspondiente sería el marcado en la figura que encabeza la siguiente página:

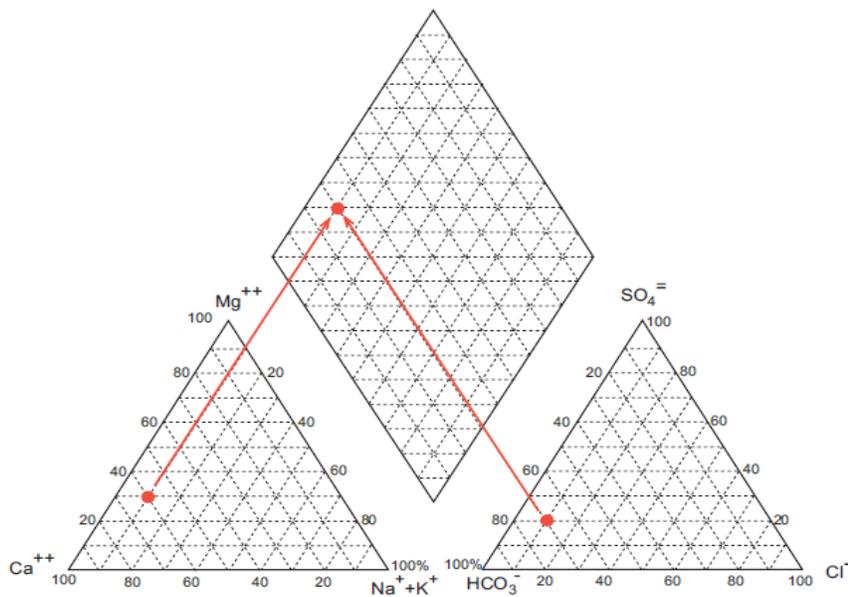
Figura 16. **Triángulo de cationes**



Fuente: *Clasificación de aguas*. http://www.bdh.lapampa.gov.ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos.html. Consulta: 4 de agosto de 2013.

De la misma forma se determinan los aniones y se grafican, luego se trasladan a un rombo que recoge la información de ambos triángulos.

Figura 17. **Traslado de triángulos hacia rombo**



Fuente: *Clasificación de aguas*. http://www.bdh.lapampa.gov.ar/lapampa/common/themes/azul/help/Diagramas_Hidroqu_micos.html. Consulta: 4 de agosto de 2013.

En la figura anterior está representado el análisis de una muestra de agua con la siguiente composición:

Ca^{+2}	=	60%	HCO_3^-	=	70%
Mg^{+2}	=	30%	SO_4^{-2}	=	20%
$\text{K}^{+1} + \text{Na}^{+1}$	=	10%	Cl^-	=	10%

3.11.2. Programas a utilizar para análisis de datos

Se utilizó el programa Microsoft Excel 2007. Este es un software que maneja hojas de cálculo que facilitan realizar operaciones, crear tablas, hacer gráficos y analizar datos, todo esto con el fin de utilizar datos calculados automáticamente y disminuir el error humano. Excel es un sistema operativo que permite realizar cálculos de forma automática y con valores exactos, facilitando también la salida de los datos por medio de impresiones.

También se utilizó el programa Microsoft Word 2007, que es un software que permite el proceso de textos facilitando la escritura, la disminución de errores ortográficos y la interacción con el usuario.

3.11.3. Prueba de la hipótesis nula y alternativa

La hipótesis nula de ningún efecto de tratamiento se probó mediante la razón de Fisher, que se define como:

$$F = \frac{(\text{MS}_{\text{tratamientos}})}{(\text{MS}_E)}$$

[Ecuación 2]

donde:

$\text{MS}_{\text{tratamientos}}$ = es la media cuadrática de los tratamientos

MS_E = es la media cuadrática del error

4. RESULTADOS

4.1. Balance iónico del agua en los diferentes pozos

Promedios anuales de concentración para el cálculo del balance iónico de los pozos estudiados.

Tabla XXIV. **Balance iónico de los pozos de la zona 18**

POZO	RODRIGUITOS			SAN RAFAEL III		
Año	2013	2014	2015	2013	2014	2015
Calcio meq/L	0,94	1,46	1,12	0,24	0,02	0,02
Magnesio meq/L	1,76	1,13	1,10	3,62	3,10	4,41
Sodio meq/L	0,82	0,12	0,17	0,00	0,00	0,00
Potasio meq/L	0,18	0,01	0,02	0,44	0,07	0,10
Carbonato meq/L	2,65	2,55	2,18	3,77	3,04	4,32
Sulfatos meq/L	0,02	0,12	0,06	0,00	0,00	0,00
Cloruros meq/L	0,30	0,37	0,21	0,39	0,32	0,34
Cationes	3,71	2,73	2,40	4,30	3,19	4,53
Aniones	2,97	3,04	2,45	4,16	3,37	4,66
Diferencia	0,74	-0,31	-0,05	0,14	-0,18	-0,13
POZO	LAS ILUSIONES			JUANA DE ARCO		
Año	2013	2014	2015	2013	2014	2015
Calcio meq/L	0,20	0,02	0,12	0,26	0,63	0,09
Magnesio meq/L	3,24	2,07	4,54	3,24	4,34	2,20
Sodio meq/L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64
Potasio meq/L	0,24	0,12	0,38	0,59	0,77	1,13
Carbonato meq/L	3,36	2,04	4,55	3,42	4,86	2,23
Sulfatos meq/L	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
Cloruros meq/L	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,76
Cationes	3,68	2,21	5,05	4,09	5,75	4,05
Aniones	3,75	2,43	4,94	3,88	5,26	2,99
Diferencia	-0,08	-0,23	0,10	0,21	0,49	1,06

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XV de tabulación, procesamiento y ordenamiento de la información.

Tabla XXV. **Balance iónico de los pozos de las zonas 23 y 24**

POZO	MIRADOR DE LA CRUZ			CANALITOS JICA		
	Año	2013	2014	2015	2013	2014
Calcio meq/L	2,34	1,76	2,79	0,90	0,74	0,84
Magnesio meq/L	2,21	2,72	2,38	1,01	0,59	0,81
Sodio meq/L	0,52	0,30	0,10	0,44	0,10	0,13
Potasio meq/L	0,07	0,15	0,01	0,12	0,01	0,01
Carbonato meq/L	4,47	4,39	5,08	1,88	1,31	1,62
Sulfatos meq/L	0,10	0,11	0,16	0,02	0,03	0,02
Clororus meq/L	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,20
Cationes	5,14	4,94	5,28	2,48	1,44	1,79
Aniones	4,97	4,90	5,63	2,30	1,73	1,84
Diferencia	0,17	0,03	-0,35	0,19	-0,29	-0,04

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XVI de tabulación, procesamiento y ordenamiento de la información.

Tabla XXVI. **Balance iónico de los pozos de la zona 12**

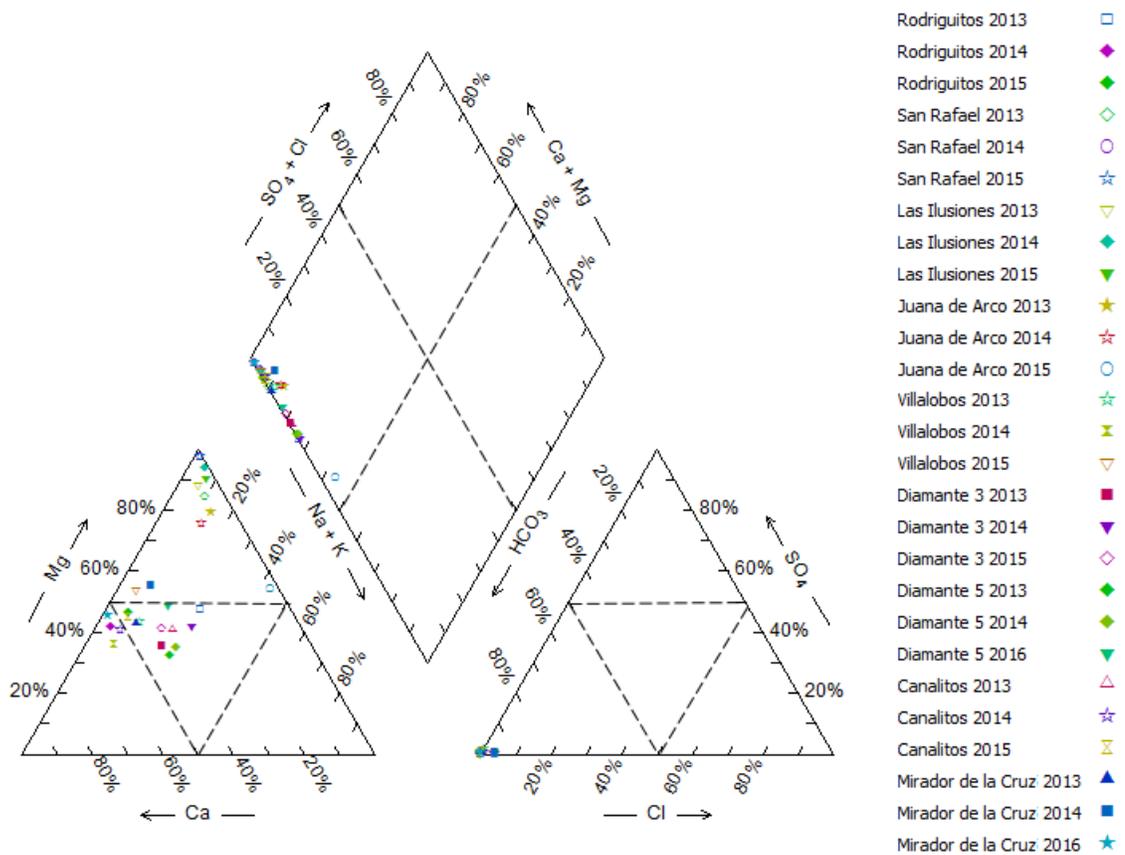
POZO	POZO VILLALOBOS			DIAMANTE 3			DIAMANTE 5		
	Año	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014
Calcio meq/L	1,00	1,19	1,06	2,32	1,58	2,49	1,88	1,86	2,29
Magnesio meq/L	0,97	0,77	1,40	1,94	2,15	2,60	1,46	1,68	3,29
Sodio meq/L	0,22	0,17	0,14	1,14	1,17	1,15	1,11	1,20	1,13
Potasio meq/L	0,04	0,01	0,01	0,07	0,25	0,07	0,06	0,07	0,07
Carbonato meq/L	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,48	0,21	0,23	0,61
Sulfatos meq/L	0,69	0,54	0,56	0,32	0,22	0,33	0,27	0,50	0,92
Clororus meq/L	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,83	0,35	0,39	1,04
Cationes	2,24	2,14	2,62	5,48	5,15	6,30	4,51	4,81	6,77
Aniones	1,31	1,17	1,19	0,95	0,84	1,65	0,83	1,12	2,57
Diferencia	0,93	0,98	1,43	4,53	4,31	4,65	3,68	3,69	4,21

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XVII de tabulación, procesamiento y ordenamiento de la información.

4.2. Diagrama de Piper de los pozos que se encuentran en las zonas 18, 12, 23 y 24 durante los tres años estudiados

En esta etapa se procedió a graficar el promedio de cada año respecto a su composición iónica. Se graficaron todos los pozos durante los tres años evaluados.

Figura 18. Diagrama de Piper



Fuente: elaboración propia, con base en las tablas XXIV, XXV y XXVI de resultados.

4.3. Comparación estadística de la actividad iónica presente en cada pozo. Análisis de ventajas y desventajas de los pozos

Tabla XXVII. Promedio y desviación estándar de la diferencia iónica por pozo.

Pozo	Promedio de diferencia	Desviación estándar
LAS ILUSIONES	-0,07	0,17
DIAMANTE 3	4,50	0,17
SAN RAFAEL III	-0,05	0,17
CANALITOS JICA	-0,05	0,24
MIRADOR DE LA CRUZ	-0,05	0,27
VILLALOBOS	1,11	0,28
DIAMANTE 5	3,86	0,30
JUANA DE ARCO	0,59	0,43
RODRIGUITOS	0,13	0,55

Fuente: elaboración propia, con base en las tablas XXIV, XXV y XXVI.

Para todos los pozos, el período de estudio comprendió tres años, del 2013 al 2015, de los cuales se obtuvo una media y a través de ella se determinó una desviación estándar en cada sistema. Esta dio como resultado tendencias similares en seis pozos, es decir menores a uno, y en tres pozos mayores a uno; este promedio se cuantificó de la diferencia entre aniones y cationes. Además de esto, se demostró a través de los valores de desviación estándar obtenidos, que las tendencias son totalmente aplicables a los datos obtenidos en la práctica del análisis de la calidad del agua, pues todos los valores fueron menores a 0,55. Por consiguiente, las ventajas y desventajas que posee cada pozo son similares.

Tabla XXVIII. **Análisis de varianza de un factor con respecto a la sumatoria de los aniones y cationes**

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Pozo</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
2013	RODRIGUITOS	6,68	3,34	0,28
	SAN RAFAEL III	8,46	4,23	0,01
	LAS ILUSIONES	7,43	3,72	0,00
	JUANA DE ARCO	7,97	3,99	0,02
	VILLALOBOS	3,55	1,78	0,43
	DIAMANTE 3	6,42	3,21	10,26
	DIAMANTE 5	5,34	2,67	6,79
	CANALITOS JICA	4,78	2,39	0,02
	MIRADOR DE LA CRUZ	10,11	5,06	0,01
2014	RODRIGUITOS	5,78	2,89	0,05
	SAN RAFAEL III	6,56	3,28	0,02
	LAS ILUSIONES	4,64	2,32	0,03
	JUANA DE ARCO	11,01	5,50	0,12
	VILLALOBOS	3,31	1,65	0,48
	DIAMANTE 3	6,00	3,00	9,29
	DIAMANTE 5	5,94	2,97	6,81
	CANALITOS JICA	3,17	1,59	0,04
	MIRADOR DE LA CRUZ	9,84	4,92	0,00
2015	RODRIGUITOS	4,85	2,42	0,00
	SAN RAFAEL III	9,18	4,59	0,01
	LAS ILUSIONES	9,99	4,99	0,01
	JUANA DE ARCO	7,05	3,52	0,56
	VILLALOBOS	3,80	1,90	1,02
	DIAMANTE 3	7,95	3,97	10,82
	DIAMANTE 5	9,34	4,67	8,84
	CANALITOS JICA	3,63	1,82	0,00
	MIRADOR DE LA CRUZ	10,91	5,45	0,06

Continuación de tabla XXVIII.

ANÁLISIS DE VARIANZA

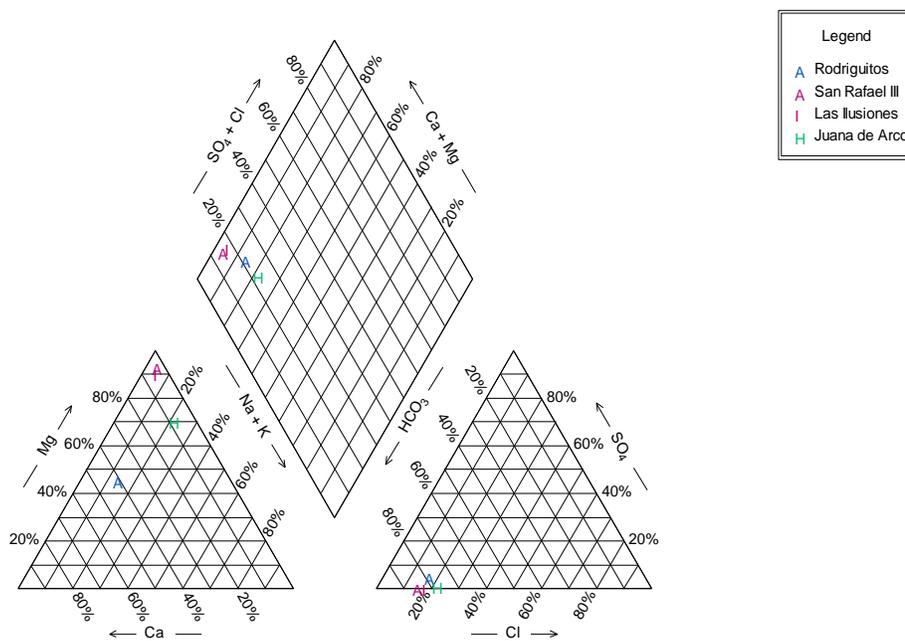
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	77 591	26	2,984	1,440	0,176	1,913
Dentro de los grupos	55 969	27	2,073			
Total	133 560	53				

Fuente: elaboración propia.

4.4. Diagrama de Piper de los pozos que se encuentran en las diferentes zonas y determinación del potencial industrial

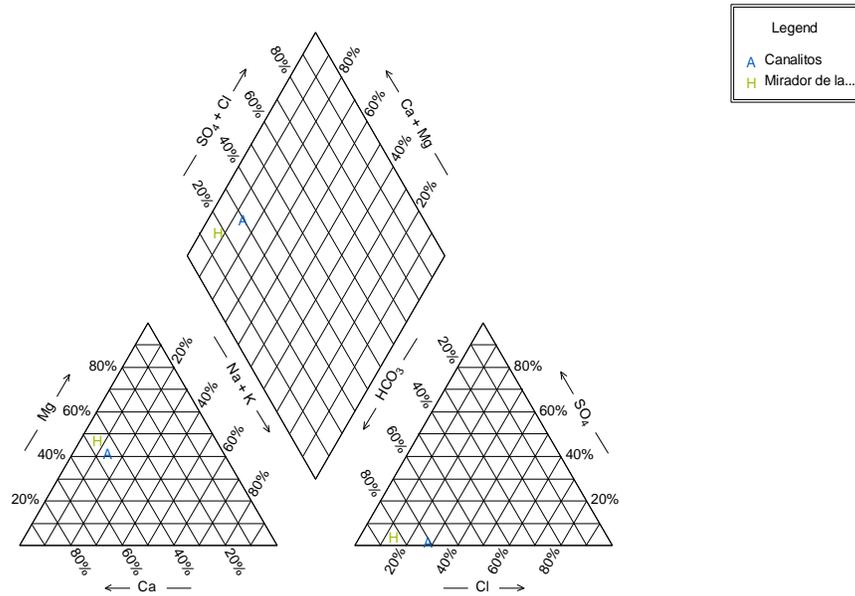
Diagrama de Piper promedio de los tres años para los pozos estudiados.

Figura 19. Diagrama de Piper de la zona 18



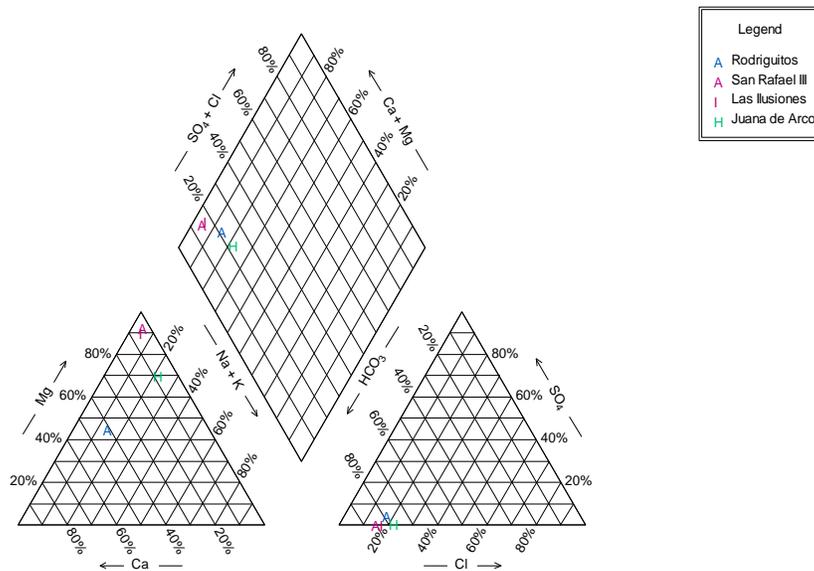
Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXIV de resultados.

Figura 20. Diagrama de Piper de las zonas 23 y 24



Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXV de resultados.

Figura 21. Diagrama de Piper de la zona 12



Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXVI de resultados.

Tabla XXIX. **Clasificación del agua de acuerdo a su ubicación en el diagrama de Piper**

Zona	Pozo	Tipo de agua
12	DIAMANTE 3	Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas Aguas magnésicas, cálcicas y sódicas Aguas bicarbonatadas
	VILLALOBOS	
	DIAMANTE 5	
18	LAS ILUSIONES	Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas Aguas magnésicas, cálcicas y sódicas Aguas bicarbonatadas
	SAN RAFAEL III	
	JUANA DE ARCO	
	RODRIGUITOS	Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas Aguas magnésicas Aguas bicarbonatadas
23 y 24	CANALITOS JICA	Bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas Aguas magnésicas, cálcicas y sódicas Aguas bicarbonatadas
	MIRADOR DE LA CRUZ	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Capas temáticas**

Capas temáticas						
Nombre de pozo	Balance	Densidad de rasgos kársticos	Densidad de drenaje fluvial	Tipo de roca	Estructura geologica	Cuerpos de agua
LAS ILUSIONES	-0.07	Industrial	Medio, es decir, entre 0.44 - 0.84 Km longitud de la Cause / Km2 área de la cuenca	Til glacial Cristalinas Carbonatadas	Acuífero o agua subterránea	Pozo
SAN RAFAEL III	-0.05					
CANALITOS JICA	-0.05					
MIRADOR DE LA CRUZ	-0.05					
RODRIGUITOS	0.13					
JUANA DE ARCO	0.59					
VILLALOBOS	1.11					
DIAMANTE 5	3.86					
DIAMANTE 3	4.50					

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXVII.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El potencial industrial que posee el agua con base en las capas estructurales y de distribución que se estudiaron varía de acuerdo a la ubicación de los pozos. Para determinar cuál zona y cuál pozo poseen el mejor potencial se realizó una comparación gráfica respecto a los componentes que posee el agua subterránea, entre los pozos ubicados en zonas industriales de la Ciudad de Guatemala. Esta se realizó a través de un diagrama de Piper, donde se evaluó la composición iónica y la clasificación del agua, según la ubicación de la primera en el diagrama. Para realizar el diagrama se deben tener cuantificados los siguientes iones: calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonato, sulfato y cloruro.

Estos siete iones son denominados especies iónicas mayores. Se denominan así dado que por lo general se encuentran en concentraciones mayores a 1 mg/L. Su alta presencia en el agua se debe a su alta movilidad, es decir que estos iones tienen estas características: alta solubilidad, alta tendencia a la absorción, alta tendencia al intercambio y abundancia relativa.

Se tomó un dato de cada ion por año de los distintos pozos, durante un rango de tres años; los datos evaluados son retrospectivos y el rango del período estudiado es del 2013 al 2015, tal como se observa en las tablas XXIV, XXV y XXVI. Estos iones tienen la tendencia a dissociarse por pares, es decir que la masa de aniones es similar a la cantidad de cationes, por lo tanto la suma de cationes debe ser igual a la suma de los aniones. Para poder verificar esto se realiza un balance iónico. Tal como se observa en el resumen de las tablas XXIV, XXV y XXVI, esta suma no se cumple con la diferencia igual a

cero, esto significa que se debe iniciar a contemplar otros iones, dado que hay otras sustancias que pueden estar presentes en el agua y estas poseen mayores cantidades de 1 mg/L y, por lo tanto, influyen y dan como resultado este fenómeno. Usualmente, esta diferencia se refiere a que en el balance iónico se encuentra presente el ion nitrato NO_3 ; también este fenómeno puede deberse a que existen contribuyentes menores o elementos denominados trazas. Los constituyentes menores son los que se encuentran presentes en el agua en concentración de 0,1 mg/L a 1 mg/L. Generalmente son el manganeso, el flúor y el boro. La cantidad encontrada de estos elementos depende de los suelos y los elementos denominados trazas, que son los que se encuentran en concentraciones menores a 0,1 mg/L. Estos generalmente son contaminantes que se encuentran en el agua como: arsénico, uranio, radio, mercurio, plomo, cromo, zinc, entre otros. Que existan elementos trazas en el agua representa un peligro significativo para cualquier uso que se le quisiera dar a esta.

Aparte de la aparición de otros elementos en el balance iónico, también se deben contemplar los errores analíticos que se pudieron tener en la obtención de los parámetros cuantificados, provocando así un fenómeno conocido como imbalance de iones. Este tipo de error se clasifica como indeterminado, dado que se debe a influencia humana, por ende se puede dar en la recolección, toma de muestra, mantenimiento, preservación y cuantificación de los datos de la muestra.

Para este estudio las fuentes de error no se pueden determinar, dado que los datos fueron proporcionados por un laboratorio y se realiza de forma retrospectiva y estadísticamente ningún estudio está libre de errores, porque estos siempre aparecen aun cuando se realizan réplicas de muestras, o se toma absoluto cuidado en la preparación y comparación de estándares

principales de análisis; también puede romperse el equilibrio con la presión y temperatura inadecuadas (condiciones ambientales del laboratorio).

Se manejaron tres muestras de cada pozo para verificar si existe alguna variación con respecto al tiempo en la composición del agua, es decir, si se reporta una variación significativa de las concentraciones de iones de cada pozo. Sin embargo, tal como se observa en la tablas XXIV, XXV y XXVI, se obtuvo diferencia entre estas y las otras muestras, con lo que se comprueba que el tiempo sí afecta la composición del agua. Este comportamiento se dio en todos los pozos estudiados.

Para la elaboración de este estudio se utilizó el software llamado AqQA, en el cual se ingresan los datos y este procede a la realización del diagrama, sin embargo, según el resultado obtenido en el diagrama de Piper (Figura No.18), todos los pozos estudiados poseen un intercepto común en el rombo, el cual clasifica el agua como bicarbonatada cálcica y/o magnésica; por consiguiente, lo que significa es que, aunque la composición del agua cambie iónicamente, siempre posee características químicas similares. Estos cambios iónicos varían, dado que las aguas subterráneas son altamente reactivas, es decir que los iones reaccionan químicamente con el agua y el terreno donde se encuentran.

Según la tabla XXVII se identifican seis pozos similares respecto a la cuantificación de su desviación estándar, dado que el valor es menor a uno. Este dato se cuantificó del promedio de la diferencia entre aniones y cationes pero, además de esto, se demostró a través de los resultados de desviación estándar obtenidos, que las tendencias son totalmente aplicables a los datos resultantes en la práctica del análisis de la calidad del agua, pues todos los valores fueron menores a 0,55, es decir que los datos obtenidos están

uniformes y que, entre los pozos estudiados, el de Rodriguitos es el que posee la mayor variabilidad respecto a los demás, y los que poseen menor variabilidad son Las Ilusiones, Diamante 3 y San Rafael III, con una desviación estándar de 0,17, lo cual quiere decir que tienen muy poca variación los datos recaudados para el análisis.

Según el resultado obtenido mediante la razón de Fisher, mostrado en la tabla XXVIII, este valor es 1,44, lo que indica que no hay diferencia significativa entre la calidad del agua de los pozos estudiados, por ende la hipótesis nula es aceptada, ya que indica que las medias poblacionales son similares. Esto se debe a que el valor crítico para Fisher es mayor que el F, por consiguiente es aceptada la hipótesis nula.

En las figuras se observan tres diagramas de Piper por diferentes zonas, en los cuales se aprecia que el área del triángulo de aniones es similar para todos los pozos (aguas bicarbonatadas) y que ocho pozos del triángulo de los cationes se localizan en la misma área (aguas magnésicas, cálcicas y sódicas) y solo un pozo difiere de esta, dado que su composición en el triángulo de cationes corresponde a otra área (aguas magnésicas). Sin embargo, todas estas se interceptan en una misma parte del rombo (aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas), tal como se observa en la tabla XXIX.

Para poder determinar el potencial industrial que posee el agua de los pozos estudiados se realizó el estudio de diferentes capas temáticas, tal como se observa en la tabla XXX, en la cual se observa que de las seis estudiadas, cinco poseen resultados similares y una columna (balance iónico) es la que difiere.

Entre estas capas se estudiaron las siguientes: densidad de rasgos kársticos, densidad de drenaje fluvial, tipo de roca, estructura geológica y cuerpos de agua. Esto se debe a que por el tipo de cuerpo de agua, todos los pozos estudiados se encuentran en el municipio de Guatemala, y así las capas temáticas son las mismas. La densidad de drenaje fluvial es media, es decir que transporta entre 0,44 y 0,84 km de longitud del cauce / Km² por área de la cuenca. Entre los factores que se vieron para determinar esta clasificación existen algunos que influyen en la densidad, tal como la litología del sustrato, permeabilidad del suelo, capacidad de infiltración y cobertura vegetal que se posee.

Sobre el resultado del tipo de roca encontrado en estas áreas, se observó que, según lo obtenido en el diagrama de Piper (figura No.18), las rocas pueden ser clasificadas en Til glacial, cristalinas y carbonatadas. Todas estas son similares en la estructura, es decir que son no difusas y bien definidas, siendo también importantes estas otras características: su tamaño de grano, características físicas y químicas, estructuras sedimentarias, composición, textura, tipo de transporte, distribución espacial, material cementante, entre otras.

CONCLUSIONES

1. La mayor diferencia en el balance iónico la poseen los pozos ubicados en la zona 12. Los pozos que poseen la menor diferencia son los ubicados en las zonas 18 y 24. Ambos resultados obtenidos son en función de la diferencia de cationes y aniones. Estas diferencias son principalmente resultado de la participación de otros iones presentes en el agua.
2. Se realizan los diferentes diagramas de Piper a partir de iones y todos los puntos de los pozos interceptan en la misma área, la cual corresponde al agua clasificada como bicarbonatada cálcica y/o magnésica.
3. Según los datos obtenidos en la prueba de Fisher, en función de la diferencia de iones, se acepta la hipótesis nula, que indica que las medias poblacionales son similares entre ellas. Por consiguiente, las ventajas y desventajas que posee cada pozo son similares, en cuanto a las capas temáticas estudiadas, densidad de rasgos kársticos, densidad de drenaje fluvial, tipo de roca, estructura geológica y cuerpo de agua.
4. Todos los pozos se clasifican en el mismo punto de intercepto en el diagrama de Piper y, según el resultado de las evaluaciones, los pozos que poseen mejor potencial son: San Rafael, Canalitos y Mirador de la Cruz.

RECOMENDACIONES

1. Establecer la realización del diagrama de Piper como medida de calidad del agua, con una medición periódica de los iones más reactivos que se encuentran presentes, con una frecuencia de una vez por mes, para determinar si hay cambios en esta con respecto a las estaciones del año.
2. Al momento de la recepción de las muestras, realizar lo antes posible el análisis químico para eliminar o disminuir la presencia de errores humanos.
3. Tomar dos muestras del agua de cada pozo, para que, en caso de incongruencia con los datos, se pueda realizar de nuevo el análisis.
4. Utilizar otros tipos de diagramas hidroquímicos para el análisis de las aguas estudiadas para comparar los resultados obtenidos, tales como Stiff o Stabler.
5. Evaluar la posibilidad de implementar un control microbiológico en el agua, para validar la inocuidad de la misma en estos análisis.

BIBLIOGRAFÍA

1. BERNAL, C. *Metodología de la investigación*. México, Pearson-Prentice Hall, 2006. 305 p.
2. CORDON, Victor. *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*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 1996. 47 p.
3. Equipo Nacional GEM Guatemala. *Reporte nacional, el comercio interno de Guatemala*. <<http://water.usgs.gov/gotita/earthgwdecline.html>>. [Consulta: 2016].
4. Estado de Guatemala. *Código Civil*. [en línea]. <http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Clima.htm>. [Consulta: 14 de agosto de 2013].
5. Estado de Guatemala. *Constitución Política de la República de Guatemala*. Reformada por Acuerdo legislativo No. 18-93 del 17 de Noviembre de 1993. [en línea]. <http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Clima.htm>. [Consulta: 14 de agosto de 2013].

6. Estado de Guatemala. Organismo Ejecutivo. *Ley del Organismo Ejecutivo*. Decreto 114-97. [en línea]. <http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Clima.htm>. [Consulta: 14 de agosto de 2013].
7. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas de la Universidad Rafael Landívar; Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente. *Situación del recurso Hídrico en Guatemala*. Documento Técnico del Perfil Ambiental de Guatemala, Guatemala, 2005. 32 p.
8. GARCÍA, Rudy. *Evaluación del consumo de agua en la zona 12 de la ciudad de Guatemala en los años 2008-2010*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2013. 80 p.
9. GRAMAJO, Byron. *Determinación de la calidad del agua para consumo humano y uso industrial, obtenida de pozos mecánicos en la zona 11, Mixco, Guatemala*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2004. 53 p.
10. HERNÁNDEZ, R. *Metodología de la investigación*. México DF, México, McGraw-Hill, 2014. 305 p.
11. HINES, W.; MONTGOMERY, D. *Probabilidad y estadística para ingeniería y administración*. México. Editorial Continental, S.A. de C.V., Segunda Edición, 1993. 834 p.

12. Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada, *Diseño de experimentos*<<http://www.iuma.ulpgc.es/~nunez/mastertecnologias/telecomunicacion/Tema3DisenodeExperimentos/doe-5-tratamientos-factoriales.pdf>>. [Consulta: 14 de agosto de 2012].
13. LILLO, J. *Técnicas Hidrogeoquímicas*. [en línea]. <http://www.escet.urjc.es/~jlillo/Tecnicas_Hidrogeoquimicas.pdf>. [Consulta: 1 de agosto de 2013].
14. LÓPEZ, L. *Calidad del agua, evaluación y diagnóstico*. Colombia. Edición de la U. Universidad de Medellín, Colombia. Primera edición, 2011. 460 p.
15. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda; Instituto Nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología. *Atlas hidrológico, República de Guatemala*. [en línea]. <http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Clima.htm>. [Consulta: 4 de octubre de 2016].
16. MONTENEGRO, Edgar. *Estudio de aguas subterráneas en zonas 10 y 14 de la ciudad de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2013. 94 p.
17. PERLMAN, H. *La ciencia del agua para las escuelas*. [en línea]. <<http://water.usgs.gov/gotita/earthgwdecline.html>>. [Consulta: 2 de octubre de 2016].

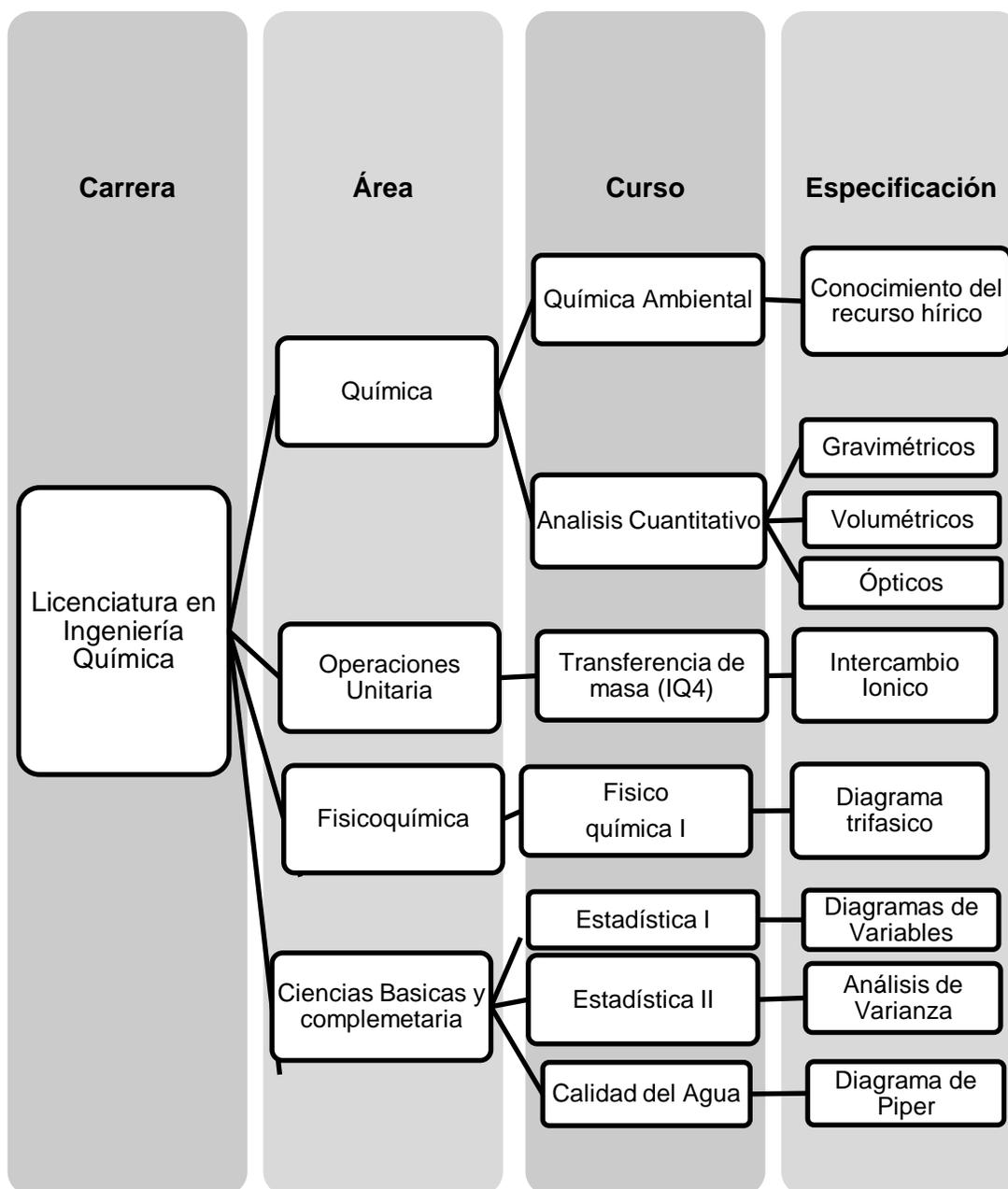
18. PILONA, A. *Guía práctica sobre métodos y técnicas de investigación documental y de campo*. Guatemala, Guatemala. Editores Autores. Octava edición, 2004. 310 p.
19. RAMÍREZ, Lilian. *Estudio sobre la calidad de agua subterránea del área noreste del valle de la ciudad capital de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2003. 150 p.
20. RUSSELL, T.; DENN, M. *Introducción al análisis en ingeniería química*. México: Limusa, 1976. 570 p.
21. SALKIND, N. J. *Métodos de investigación*. México DF, México: Pearson Educación, 1999. 382 p.
22. SANCHEZ, J. *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos*. [en línea]. <<http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>>. [Consulta: 4 de agosto de 2013].
23. Sonitec-Vortisand Inc. *Mapa de potencial de aguas*. [en línea]. <<http://www.sonitec.com/en/home.html>>. [Consulta: 14 de agosto de 2012].
24. TARBUCK, E.; et al. *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. [en línea]. <<http://www.osop.com.pa/wp-content/uploads/2014/04/TARBUCK-y-LUTGENS-Ciencias-de-la-Tierra-8va-ed.-1.pdf>>. [Consulta: 10 de agosto 2016].

25. VARA, A. *7 pasos para una tesis exitosa*. Instituto de Investigación de la Facultad de Ciencias Administrativas y Recursos Humanos, Lima, Perú, 2008. 97 p.

26. VILLAR, Marco. *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 de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2008. 69 p.

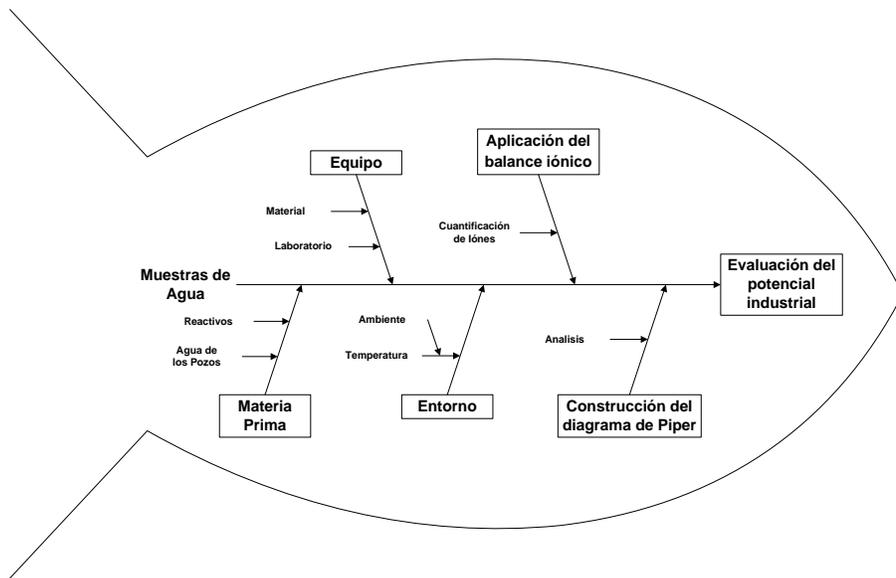
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



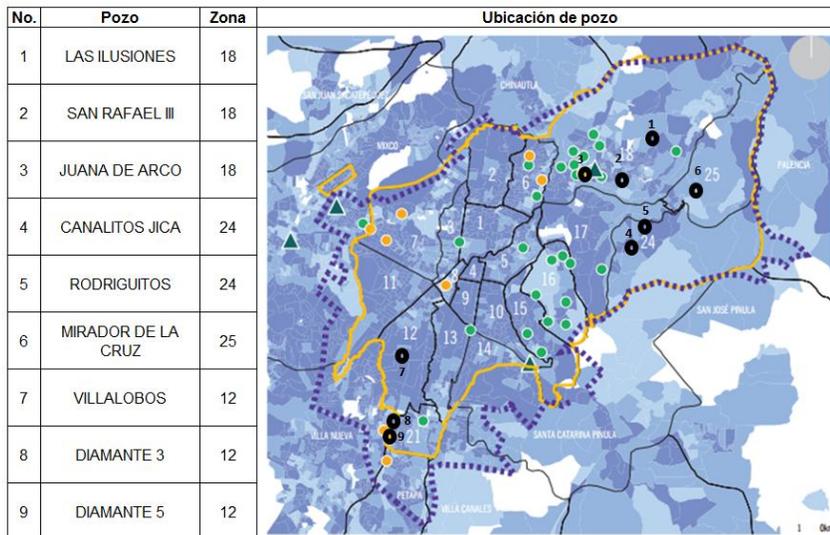
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Mapa de ubicación de los pozos estudiados



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Empresas ubicadas en las distintas zonas**

NOMBRE DE LA INDUSTRIA	DIRECCIÓN DE LA INDUSTRIA
Calera del norte	Carretera al Atlántico, Km 8.5, Zona 24
Pisos el Aguila	Carretera al Atlántico, Km 11.5, Zona 24
Polar Cool Car	16 Avenida, Zona 24
Avicula Fatima	Avenida 23-13, Zona 25
Arrocera San Francisco SA	Carretera al Atlántico, Km 21.7, Zona 25
Transportes Cuevas	Carretera al Atlántico, Km 10.5, Zona 25
Z Gas- Atlántico	km 17.5, carretera al Atrántico, Aldea el Chato, Zona 25
Almacenadora de Servicios	Ruta al Atlántico, Km 5, Zona 17
Bodegas DHL / Jhonson & Jhonson	3 Calle, 14-30 Zona 17
Café Incasa	5A Calle, Zona 17
Embutidos Bremen	Km 5.5, ruta al Atlántico, Zona 17
Constructora Codico	Carretera CA-9, Zona 17
Inmaco	Km 4.5, Ruta al Atlántico, Zona 17
Red Ecologica	Carretera al Atlántico, Km 10, Zona 17
Bodegas Atlantico	Km 7, Ruta al Atlántico, Carretera CA-9, Zona 17
Da Gas	Carretera al Atlántico, Km 10, Zona 17
Pepsi Norte	1a. Calle 20-10, Zona 17
Tecnifibras	13 Calle 12-50, Zona 17, Lomas del Norte
Claro	Km 5.5, ruta al Atlántico, Zona 17
Industria de Ganaderos Exguapagra	Carretera al Atlántico, Zona 17
AMR Producciones SA	2a. Avenida 13-35, Zona 17, Ofibodegas los Almendros, Bodega 31
Inductrias alimenticas Kern's y CIA SA	CA-9 Norte (Ruta al Atlántico) 9-60, Zona 17
Papelera Internacional SA	Km 10, ruta al Atlántico, Zona 17
Corporación Lancasco	1ra calle 14-97, Zona 18, Colonia Lavarreda
Grupo Rio Vinyl	Km 6, Ruta al Atlántico, Zona 18
Multimateriales	Sucrusal Zona 18, Carretera al Atlántico
Rollos y Mas, papelería	Ofibodegas 26 Interbodegas, 7a Calle 3-24 Zona 18
La Roca	Km 10.5, Ruta al Atlántico, Zona 18, 31 Ave.
Perfiles del Norte	11 Av, Zona 18
Internacional de Guatemala	Km 6.5, ruta al Atlántico, Zona 18
Transportes Pineda Rossell SA	Km 6.5, ruta al Atlántico, Zona 18, pasaje Industrial Galilea
Sucursal Coca Cola	Km 5.5, Zona 18
Keenworh de Centro America	Atlántico Km 6.5, Zona 18, Pasaje Industrial Galilea
Prodin	Atlántico Km 6.5, Zona 18, Pasaje Industrial Galilea
Tragirsa	13 CA & 4 Avenida, Zona 18
Bits Developmente	37-31c portal del bosque Guatemala, 1 Ave, Zona 18

Continuación apéndice 4.

NOMBRE DE LA INDUSTRIA	DIRECCIÓN DE LA INDUSTRIA
Aceros Suarez SA	42 Calle 22-22, zona 12
CBC	43 calle 1-10, zona 12, Monte Maria 1
DHL Global Forwarding	46 Calle 24-30, zona 12
Bac - Credomatic	Avenida Petapa 38-39, zona 12
Aceros Prefabricados SA	24 calle 26-70, zona 12
Café Quetzal	17 Avenida 46-39, zona 12
Café Leon SA	40 calle 22-65, zona 12
División Industrial Pecuaria	46 calle 21-89, zona 12
Dunkin Donuts	Avenida del ferrocarril, 19-97, zona 12, el cortijo 1 bodega 805B
Amanco	Av. Del Ferrocarril 16-67, zona 12
Clariant	27 Avenida 33-85, zona 12, parque Global
Gas Wackenhut	Ave. Petapa 42-51, zona 12
Grupo Coban	24 calle 20-59, zona 12
Grupo Cobra	Avenida Petapa 46-11, zona 12
Grupo Lala	46 calle 21-55, zona 12
Helps International	Calzada Atanasio Tzul 21-00, zona 12, complejo Empresarial el Cortijo II, Bodega 517
Guatex	14 Avenida 4-11, zona 12
Intertek	46 calle 21-53, zona 12
Ix Chebel SA	52 calle, Avenida Petapa, zona 12
Malher SA	48 calle 15-74, zona 12
Kimberly Clark	Calzada Atanasio Tzul 47-79, zona 12
Pades Centro Dos SA	18 Avenida 38-24, zona 12
Peseresa	31 calle 1-48, zona 12, Colonia el Carmen
Proval SA	4 Calle 3-43, zona 12, Edificio Intercargo nivel 4 of 407
Seneca	Calzada Atanasio Tzul, complejo empresarial el cortico II, Bodega 223, zona 12
Serlogic SA	47 calle 18-05, zona 12
La torre y Econosuper	8C, 7-63, zona 12
Sur Color SA	49 Calle 24-47, zona 12
Ventas Unidas SA	Avenida Petapa 53-00, zona 12
Vidriera Guatemalteca SA	Ave. Petapa 48-01, zona 12

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Mapa de cobertura de agua potable en la Ciudad de Guatemala y en el Departamento

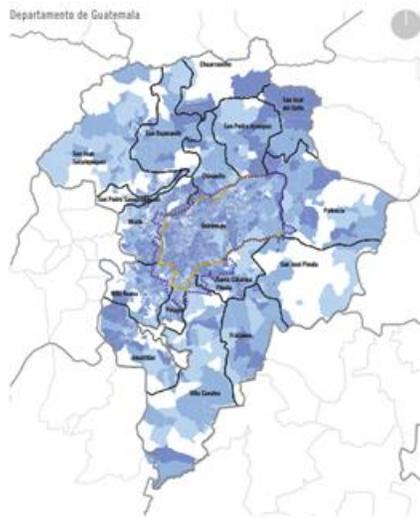
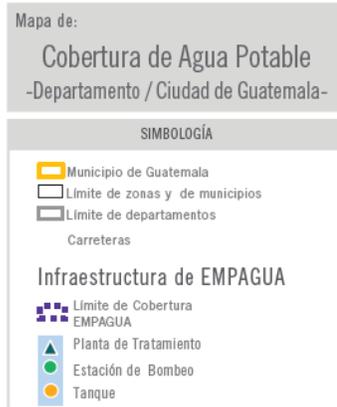
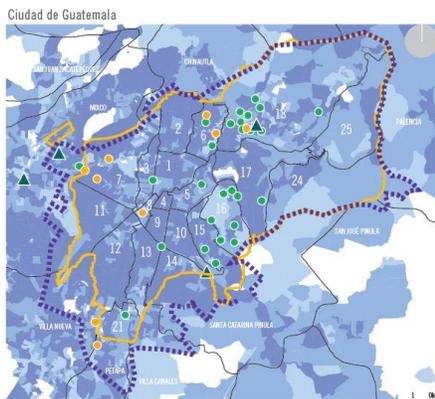


Tabla de Coberturas de Agua Potable por Zonas

ZONA	HOGARES	MUNICIPAL			OTRO SERVICIO			
		EXCLUSIVO	COMPART	PUBLICO	POZO	CAMION	RIO	OTRO
1	16,568	83.14%	7.45%	2.09%	1.65%	2.60%	0.13%	2.94%
2	5,788	92.10%	3.06%	1.69%	1.04%	0.38%	0.02%	1.71%
3	6,322	75.66%	7.91%	10.61%	0.24%	2.21%	0.02%	3.35%
4	456	72.59%	14.25%	6.36%	0%	3.51%	0%	3.29%
5	15,494	83.57%	11.71%	1.97%	0.70%	0.63%	0%	1.41%
6	17,930	86.72%	4.05%	3.66%	0.67%	1.85%	0.02%	3.02%
7	32,082	78.47%	11.63%	3.28%	0.65%	0.62%	0.30%	5.06%
8	2,913	74.80%	18.40%	2.71%	0%	2.54%	0%	1.54%
9	522	95.59%	0.19%	0.38%	2.68%	0%	0%	1.15%
10	3,381	88.97%	0.27%	1.12%	5.24%	0.59%	0.27%	3.55%
11	9,979	92.28%	3.43%	1.09%	0.19%	0.38%	0%	2.63%
12	10,853	84.73%	8.38%	1.77%	0.41%	1.93%	0.01%	2.76%
13	6,441	77.67%	5.08%	2.00%	2.34%	4.15%	0%	8.76%
14	4,668	81.53%	0.79%	3.45%	2.49%	8.16%	0.04%	3.53%
15	3,826	91.30%	3.37%	2.77%	1.54%	0.18%	0%	0.84%
16	4,324	79.02%	7.56%	6.24%	1.27%	3.77%	0.35%	1.78%
17	5,305	79.72%	5.09%	7.65%	1.06%	5.58%	0.09%	0.81%
18	44,188	78.43%	9.53%	2.35%	2.22%	3.42%	0.32%	3.73%
19	5,812	85.81%	1.69%	1.27%	0.29%	8.21%	0.03%	2.70%
21	17,733	76.59%	9.38%	0.87%	2.52%	5.58%	0.08%	4.99%
24	3,205	80.56%	3.06%	6.71%	3.59%	1.50%	1.44%	3.15%
25	4,179	73.27%	3.33%	1.94%	6.41%	9.33%	2.03%	3.69%
TOTALES	221,969	81.45%	7.81%	2.80%	1.49%	2.75%	0.20%	3.49%

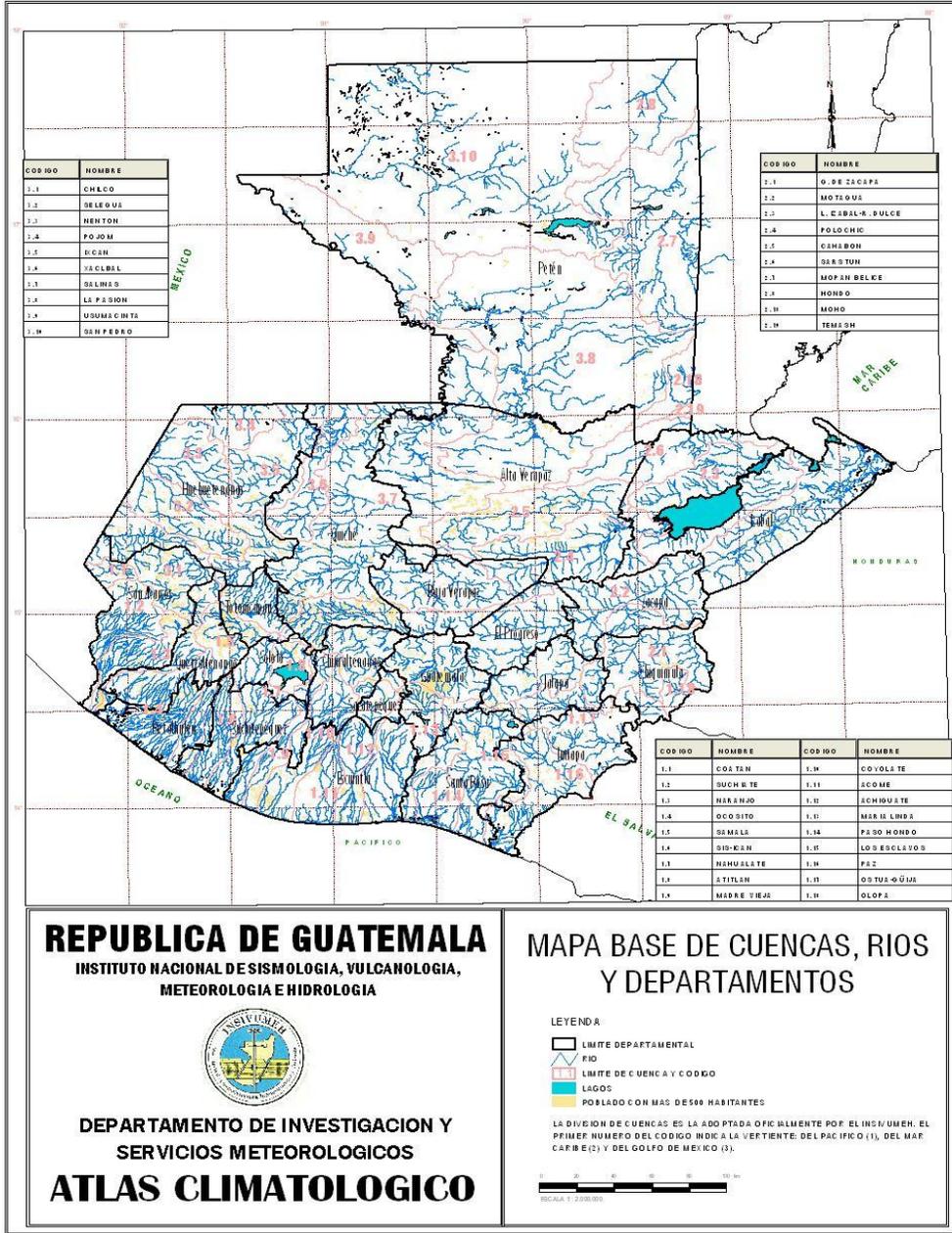
Fuente: IX Censo de Habitación y VI Censo de Población 2002. INE



Fuente: Empagua.

http://infocidad.muniguate.com/Site/11_Cobertura_de_agua_potable_files/11_Cobertura%20de%20agua%20potable.pdf. Consulta: 29 de septiembre 2016.

Anexo 2. Atlas hidrológico



Fuente: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.

http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Clima.htm.

Consulta: 04 de octubre 2016

Anexo 3. Agua potable. Especificaciones. NGO 29 001:98

AGUA POTABLE. Especificaciones.		Abril 1999 1/14
		COGUANOR NGO 29 001:98 1ª. Revisión
<p>Esta norma constituye la primera revisión a la norma COGUANOR NGO 29 001 AGUA POTABLE. Especificaciones, publicada en el Diario oficial del 18 de octubre de 1985, a la cual sustituye.</p>		
<p>1. OBJETO</p> <p>Esta norma tiene por objeto fijar los valores de las características que definen la calidad del agua potable.</p>		
<p>2. NORMAS COGUANOR A CONSULTAR</p> <p>COGUANOR NGO 4 010 Sistema internacional de unidades (SI)</p> <p>COGUANOR NGO 29 011h2 Aguas. Ensayos físicos. Determinación del color método de referencia.</p> <p>COGUANOR NGO 29 011h12 Aguas. Ensayos físicos. Determinación de la turbiedad.</p> <p>COGUANOR NGO 29 012h14 Aguas. Determinación de metales. Dureza.</p> <p>COGUANOR NGO 29 012h15 Aguas. Determinación de metales. Hierro.</p> <p>COGUANOR NGO 29 013h3 Aguas. Determinación de constituyentes inorgánicos no metálicos. Alcalinidad.</p> <p>COGUANOR NGO 29 013h7 Aguas. Determinación de constituyentes inorgánicos no metálicos. Cloruro.</p> <p>COGUANOR NGO 29 013h13 Aguas. Determinación de constituyentes inorgánicos no metálicos. Fluoruro.</p> <p>COGUANOR NGO 29 013h18 Aguas. Determinación de constituyentes inorgánicos no metálicos. Nitrógeno (nitrate).</p> <p>COGUANOR NGO 29 013h19 Aguas. Determinación de constituyentes inorgánicos no metálicos. Nitrógeno (nitrito).</p> <p>COGUANOR NGO 29 013h21 Aguas. Determinación de constituyentes orgánicos no metálicos. Oxígeno disuelto. Método de referencia.</p> <p>COGUANOR NGO 29 013h23 Aguas. Determinación de constituyentes inorgánicos no metálicos. Potencial de hidrógeno (pH).</p>		
<p>3. DEFINICIONES</p> <p>3.1 Agua potable. Es aquella que por sus características de calidad especificadas en esta norma, es adecuada para el consumo humano.</p> <p>3.2 Cloro. Es el elemento número 17 de la tabla periódica de los elementos. En condiciones normales de temperatura y presión es un gas verde, poderoso oxidante, dos y media veces más pesado que el aire.</p> <p>Nota 1. El cloro es, sin duda alguna, el desinfectante más importante que existe, debido a que reúne todas las ventajas requeridas, además de ser de fácil utilización y menos costoso que la mayoría de los otros productos o agentes desinfectantes disponibles.</p> <p>3.3 Límite máximo aceptable (LMA). Es el valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba del cual el agua pasa a ser rechazable por los consumidores, desde un punto de vista sensorial pero sin que implique un daño a la salud del consumidor.</p> <p style="text-align: right;">Continúa</p>		
<p>Publicada en el Diario Oficial de fecha 4 DE FEBRERO DEL 2000.</p>		

COMISION GUATEMALTECA DE NORMAS-COQUANOR-MINISTERIO DE ECONOMIA, GUATEMALA, C.A.

Continuación anexo 3.

3.4 Límite máximo permisible (LMP) Es el valor de la concentración de cualquier característica de calidad del agua, arriba del cual, el agua no es adecuada para consumo humano.

3.5 Características físicas. Son aquellas características relativas a su comportamiento físico, que determinan su calidad.

3.6 Características químicas. Son aquellas características relativas a sustancias contenidas en ella, que determinan su calidad.

3.7 Características bacteriológicas. Son aquellas características relativas a la presencia de bacterias, que determinan su calidad.

3.7.1 Grupo coliforme total. Son bacterias en forma de bacilos, aerobios y anaerobios facultativos, Gram negativos, no esporulados que fermentan la lactosa con producción de ácido y de gas a 35 °C ± 0.5°C en un período de 24 h - 48 h, características cuando se investigan por el método de los tubos múltiples de fermentación. Para el caso de la determinación del grupo coliforme total empleando el método de membrana de filtración, se definirá como todos los microorganismos que desarrollen una colonia rojiza con brillo metálico dorado en un medio tipo endo (u otro medio de cultivo reconocido internacionalmente) después de una incubación de 24 h a 35 °C.

3.7.2 Grupo coliforme fecal. Son las bacterias que forman parte del grupo coliforme total, que fermentan la lactosa con producción de gas a 44°C ± 0.2°C en un período de 24 h ± 2 h cuando se investigan por el método de los tubos múltiples de fermentación. En el método de filtración en membrana se utiliza un medio de lactosa enriquecido y una temperatura de incubación de 44.5 °C ± 0.2 °C en un período de 24 h ± 2 h. Al grupo coliforme fecal también se le designa como termotolerante o termorresistente.

3.8 Escherichia coli. Son las bacterias coliformes fecales que fermentan la lactosa y otros sustratos adecuados como el manitol a 44°C ó 44.5°C con producción de gas, y que también producen indol a partir de triptofano.

Nota 2. La confirmación de que en verdad se trata de *Escherichia coli* se logra mediante el resultado positivo en la prueba con el indicador rojo de metilo, la comprobación de la ausencia de síntesis de acetilmetilcarbinol y de que no se utiliza el citrato como única fuente de carbón. La *Escherichia coli* es el indicador más preciso de contaminación fecal.

4. **CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES FÍSICAS Y QUÍMICAS**

4.1 Características físicas.

Tabla 1. Características sensoriales. Límite máximo aceptable (LMA) y límite máximo permisible (LMP) que debe tener el agua potable (Continuación)

Características	LMA	LMP
Color	5.0 u	35.0 u (1)
Olor	No rechazable	No rechazable
Sabor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5.0 UNT	15.0 UNT (2)

(1) Unidades de color en la escala de platino-cobalto

(2) Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT). Estas siglas deben considerarse en la expresión de los resultados.

4.1.1 Conductividad eléctrica. El agua potable deberá tener una conductividad de 100 µS/cm a 750 µS/cm a 25°C.

4.2 Características químicas del agua potable. Son aquellas características que afectan la potabilidad del agua y que se indican en la tabla 2 siguiente.

Continúa

Tabla 2. Substancias químicas con sus correspondientes límites máximos aceptables y límites máximos permisibles

Características	Límite máximo aceptable	Límite máximo permisible
Cloro residual libre (1) (2)	0,5 mg/L	1,0 mg/L
Cloruro (Cl)	100.000 mg/L	250.000 mg/L
Conductividad	—	< de 1 500 µS/cm
Dureza Total (CaCO ₃)	100.000 mg/L	500.000 mg/L
Potencial de hidrógeno (3)	7,0-7,5	6,5-8,5
Sólidos totales disueltos	500,0 mg/L	1 000,0 mg/L
Sulfato (SO ₄ ⁻)	100.000 mg/L	250.000 mg/L
Temperatura	15,0°C-25,0°C	34,0°C
Aluminio (Al)	0,050 mg/L	0,100 mg/L
Calcio (Ca)	75.000 mg/L	150.000 mg/L
Cinc (Zn)	3.000 mg/L	70.000 mg/L
Cobre (Cu)	0,050 mg/L	1,500 mg/L
Magnesio (Mg)	50.000 mg/L	100.000 mg/L

- (1) El límite máximo aceptable, seguro y deseable de cloro residual libre, en los puntos más alejados del sistema de distribución es de 0,5 mg/L, después de por lo menos 30 min de contacto, a un pH menor de 8,0, con el propósito de reducir en un 99% la concentración de *Escherichia coli* y ciertos virus.
- (2) En aquellas ocasiones en que amenacen o prevalezcan brotes de enfermedades de origen hídrico, el residual de cloro puede mantenerse en un límite máximo permisible de 2,0 mg/L, haciendo caso omiso de los olores y sabores en el agua de consumo. Deben de tomarse medidas similares en los casos de interrupción o bajas en la eficiencia de los tratamientos para potabilizar el agua.
- (3) En unidades de pH.

4.3 Agua clorada. La cloración de los abastecimientos públicos de agua representa el proceso más importante usado en la obtención de agua de calidad sanitaria segura, potable. La desinfección por cloro y sus derivados significa una disminución de bacterias y virus hasta una concentración inocua, por lo que en la tabla 2 se hace referencia a los límites adecuados de concentración de cloro libre residual que es aquella porción del cloro residual total que esté "libre" y que sirva como medida de capacidad para oxidar la materia orgánica que pueda encontrarse en el interior de las tuberías o por ruptura de las mismas que pueda producir cierta contaminación microbiológica.

4.4 Límites de toxicidad. En la tabla 3 se indican algunas substancias o compuestos químicos que al sobrepasar el límite máximo permisible en el agua potable, causan toxicidad.

Tabla 3. Relación de las substancias inorgánicas con significado para la salud, con su respectivos límites máximos permisibles (LMP)

Substancia	LMP, en miligramos por litro
Arsénico (As)	0,010
Bario (Ba)	0,700
Boro (B)	0,300
Cadmio (Cd)	0,003
Cianuro (CN ⁻)	0,070
Cromo (Cr)	0,050
Mercurio (Hg)	0,001
Plomo (Pb)	0,010
Selenio (Se)	0,010

4.5 Relación de las substancias biocidas con sus respectivos límites máximos permisibles. Los nombres de las sustancias biocidas orgánicas sintéticas, así como el límite máximo permisible se describen en la tabla 4.

Continúa

Continuación anexo 3.

COCUANOR NCG 20-004 4/14

Tabla 4. Límites máximos permisibles de las sustancias biocidas (continuación)

Compuestos	LMP (en microgramos/litro)
Insecticidas organoclorados	
DDT + TDE + DDE	1.0
Hexaclorobenceno	1.0
Aldrin	0.03
Dieldrin	0.03
Heptacloro	0.2
Heptacloro epóxido	0.1
Lindano	0.2
Endrin	0.2
Metoxicloro	20
Clordano	0.2
Toxafeno	3.0
Pentaclorofenol	1.0
Dinoseb	7.0
Acidos fenoxi	
2, 4-D	30
2, 4, 5-TP (silvex)	9
2, 4, 5-T	9
Mecoprop	10
Dicloroprop	100
MCPA	2
Dicamba	2
Picloram	500
Dalapón	200
Endotal	100
Fumigantes	
DBCP (1,2-dibromuro-3,3-cloropropano)	0.2
EBD (dibromuro de etileno)	0.05
1,2-dicloropropano	5.0
1,3-dicloropropano	20
Triazinas	
Atrazina	2
Simazina	2
Acetanilidas	
Alaclor	2
Metolaclor	10
Propaclor	10
Butaclor	10
Carbamatos	
Aldicarb	3
Sulfóxido de aldicarb	3
Sulfona de aldicarb	3
Carbofurán	5
Oxamil	200
Metomil	200
Bentazón	30
Molinato	6
Pendimetalina	20
Isoproturón	9

Continúa

Continuación anexo 3.

Tabla 4. Límites máximos permisibles de las sustancias biocidas (conclusión)

Compuesto	LMP (en microgramos litro)
Piretroídes	
Permetrina	20
Amidas	
Propanil	20
Piridato	100
Trifluralín	20
Diquat	20
Glifosato	700
Di (2-etil-hexil adipato)	400
Benzopireno	0,2
Hexaclorociclopentadieno	50
Di (etil-hexil) ftalato	6
PCB'S	0,5
Organo fosforados	
Etil paratión	0
Leptofós	0
Diazinón	0,1
Dimetoato	0,1
De los restantes organo fosforados	no más de 0.1 cada uno

Tabla 5. Sustancias no deseadas. Límite máximo aceptable (LMA) y límite máximo permisibles (LMP)

Característica	LMA, en miligramos/litro	LMP, en miligramos/litro
Fluoruro (F)	—	1.700
Hierro total (Fe)	0.100	1.000
Manganeso (Mn)	0.050	0.500
Nitrato (NO ₃)	—	10
Nitrito (NO ₂)	—	1

Tabla 6. Sustancias orgánicas con significado para la salud y su límite máximo permisible (LMP)

Compuesto	LMP, en microgramos/litro
Benceno	5
Cloruro de vinilo	2
Detergentes aniónicos	200
o-diclorobenceno	600
p-diclorobenceno	75
1,2-dicloroetano	5
1,1-dicloroetileno	7
cis-1,2-dicloroetileno	70
trans-1,2-dicloroetileno	100
1,2-dicloropropano	5
Estireno	100
Etilbenceno	700
Monoclorobenceno	100
Sustancias fenólicas	2
Tetracloruro de carbono	5
Tetracloroetileno	5
Tolueno	1000
1,1,1-tricloroetano	200
Tricloroetileno	5
Xileno	10000

Continúa

5. CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS.

Las características para agua potable estipulan el número permisible de microorganismos coliformes, fecales en términos de las porciones normales de volumen y del número de porciones que se examina, con esta finalidad se establecen las alternativas siguientes.

5.1 Método de los tubos múltiples de fermentación

5.1.1 Para nuevas introducciones de agua, en la evaluación de las plantas de tratamiento y evaluaciones anuales, se debe proceder como se indica en las literales a) y b) siguientes:

a) Prueba de 15 tubos. Se examinan 5 tubos con porciones de 10 mL, 5 tubos con porciones de 1 mL y 5 tubos con porciones de 0.1 mL, la ausencia de gas en todos los tubos se expresa como número más probable menor de 2.0 coliformes en 100 mL de agua, lo que se interpreta como que esa muestra aislada satisface la norma de calidad y el agua es adecuada para el consumo humano (véase anexo 2).

b) Prueba de 9 tubos. Se examinan 3 tubos con porciones de 10 mL, 3 tubos con porciones de 1 mL y 3 tubos con porciones de 0.1 mL, la ausencia de gas en todos los tubos se expresa como número más probable menor de 3.0 coliformes en 100 mL, lo cual se interpreta como un indicador de que esa muestra aislada satisface la norma de calidad y el agua es adecuada para consumo humano (véase anexo 3). En el caso de análisis rutinarios y cuando se analizan cantidades grandes de muestras, se podrá emplear el método de los 9 tubos, pero en casos de discrepancia o inconformidad con los resultados obtenidos, deberá emplearse la prueba de los 15 tubos como método de referencia.

5.1.2 Para casos en los cuales ya se tiene un historial, se permiten las alternativas siguientes:

a) 5 tubos con porciones de muestra de 10 mL. La ausencia de gas en todos los tubos, se expresa como número más probable menor de 2.2 coliformes en 100 mL de agua. Véase anexo 2.

b) 10 tubos con porciones de muestra de 10 mL cada una, la ausencia de gas en todos los tubos se expresa como número más probable menor de 1.1 coliformes en 100 mL de agua, lo que se interpreta como que esa muestra es adecuada para el consumo humano. Véase anexo 4.

5.2 Método por la membrana de filtración. El volumen de muestra de agua a utilizar con la membrana de filtración es de 100 mL. Se acepta como límite una colonia de coliformes totales y ausencia de *Escherichia coli* en 100 mL de agua. La ausencia de coliformes se interpreta como que esa muestra aislada satisface la norma de calidad y el agua es adecuada para el consumo humano.

Nota 3. De ser necesario se deberán analizar porciones de 1 mL, 0.1 mL y 0.01 mL a fin de diluir muestras muy contaminadas para la obtención de resultados que puedan ser interpretados más adecuadamente.

5.3 Límites

5.3.1 Método de los tubos múltiples de fermentación. Según se indique por las muestras que se examinen, la presencia de microorganismos del grupo coliforme, no debe exceder de los siguientes límites:

Tabla 7. Límites para el método de los tubos múltiples de fermentación, grupo coliforme

Quando se examinan porciones de 10 mL.	No más del 10% deben mostrar, en cualquier mes, la presencia del grupo coliforme
No se permitirá la presencia del grupo coliforme en tres o más de las porciones de 10mL de una muestra normal, cuando ocurran:	- En dos muestras consecutivas - En más de una muestra mensual, cuando se examinan mensualmente menos de 20 muestras - En más de 5% de las muestras, cuando se examinan mensualmente más de 20 muestras

5.3.2 Método de las membranas de filtración. cuando se aplique este método el número de microorganismos del grupo coliforme no debe exceder los siguientes límites:

Continúa

Continuación anexo 3.

Tabla 8. Límites para el método de las membranas de filtración, grupo coliforme

La media aritmética de todas las muestras normales que se examinen en un mes no debe exceder de:	Un microorganismo/100 mL
El número de colonias por muestra normal no ha de exceder de 3/50 mL, 4/100 mL, 7/200 mL ó 13/500 mL en:	<ul style="list-style-type: none"> - Dos muestras consecutivas - En más de una muestra mensual, cuando se examinan mensualmente menos de 20 muestras - Más del 5% de las muestras normales, cuando se examinan mensualmente más de 20 muestras

5.4 Se establece el número de muestras en relación a la población servida de acuerdo a la tabla 7 siguiente.

Tabla 9. Frecuencias mínimas de la toma de muestras y análisis del agua para consumo humano en sistemas de distribución

Población servida en número de habitantes	Cantidad de muestras al año		
	Análisis E1	Análisis E2	Análisis E3
1 - 500	2	1	(1)
501 - 5 000	4	1	(1)
5 001 - 10 000	12	3	(1)
10 001 - 50 000	60	6	1
50 001 - 100 000	120	12	2
100 001 - 150 000	180	18	3
150 001 - 300 000	360	36	6
300 001 - 500 000	360 (2)	60	10
500 001 - 1 000 000	360 (2)	120 (2)	20 (2)
1 000 001 - 5 000 000	360 (2)	120 (2)	20 (2)

(1) La frecuencia deberá ser determinada por las autoridades nacionales competentes.

(2) Las autoridades nacionales competentes deberán esforzarse, de ser posible, por aumentar esta frecuencia.

E1 Corresponde al programa de análisis básico, fácilmente ejecutable por cada laboratorio de control de calidad del agua autorizado. Los análisis en esta etapa de control son: coliforme fecal, cloro residual.

E2 Corresponde al programa de análisis normal y comprende la ejecución de los análisis de la etapa anterior ampliado con: olor, sabor, color, turbiedad, temperatura, pH, conductividad, cloruros, dureza, sulfatos, calcio, magnesio, nitratos, nitritos, hierro, manganeso.

E3 Corresponde a un programa de análisis avanzado de agua potable. Comprende la ejecución de los análisis de la segunda etapa, ampliado con: aluminio, cobre, sodio, potasio, amonio, fluoruro, arsénico, cadmio, cianuro, cromo, mercurio, níquel, antimonio, plomo, selenio, sulfuro de hidrógeno, zinc, sólidos totales disueltos, desinfectantes, subproductos de la desinfección y sustancias orgánicas (plaguicidas) de significado para la salud.

6. METODOS DE ANALISIS

6.1 Las determinaciones de las especificaciones y características fisico-químicas y microbiológicas del agua, indicadas en la presente norma, deben realizarse de acuerdo con las normas COGUANOR correspondientes; véase capítulo 2. En ausencia de normas COGUANOR podrán emplearse los métodos de la American Water Works Association.

Continúa

7. MUESTREO

7.1 El muestreo para el análisis físico-químico y microbiológico del agua, indicadas en la presente norma, deben realizarse de acuerdo con las normas COGUANOR correspondientes; véase capítulo 2. En ausencia de normas COGUANOR podrán emplearse los métodos de la American Water Works Association.

8. CORRESPONDENCIA

Para la elaboración de la presente norma se han tomado en cuenta los siguientes documentos.

- a) Norma COGUANOR NGO 29 001. AGUA POTABLE. Especificaciones, 1985.
- b) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, de la American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF), 18th Edition, 1992.
- c) Organización Mundial de la Salud. Guías para la Calidad el Agua Potable, segunda edición, Ginebra, 1995.

9. ANEXOS

9.1 Anexo 1

Agua Fluorurada. Cuando al agua potable se le ha adicionado compuestos derivados del flúor debe de haber una reacción entre los límites de la concentración del ión fluoruro en función del promedio anual de las máximas temperaturas diarias del aire.

Tabla 10. Promedio de temperatura y límites recomendados para la concentración de fluoruro

Promedio de temperatura máxima diaria en grados Celsius (°C)(1)	Límites recomendados para la concentración del ión fluoruro en miligramos/litro		
	Mínimo	Óptimo	Máximo
10.1 - 12.0	0.9	1.2	1.7
12.1 - 14.6	0.8	1.1	1.5
14.7 - 17.7	0.8	1.0	1.3
17.8 - 21.4	0.7	0.9	1.2
21.5 - 26.3	0.7	0.8	1.0
26.4 - 32.5	0.6	0.7	0.8

(1) Los promedios de temperatura deben obtenerse en base a datos correspondientes a un mínimo de 5 años.

9.2 Anexo 2

Tabla 11. Número más probable para diversas combinaciones de resultados positivos y negativos cuando se utilizan cinco porciones de 10 mL, cinco porciones de 1 mL y cinco porciones de 0.1 mL.
(Continuación)

Número de tubos que dan reacción positiva				Número de tubos que dan reacción positiva			
5 de 10 mL cada uno	5 de 1 mL cada uno	5 de 0.1 mL cada uno	NMP	5 de 10 mL cada uno	5 de 1 mL cada uno	5 de 0.1 mL cada uno	NMP
0	0	0	<2	1	1	0	4
0	0	1	2	1	1	1	6
0	1	0	2	1	2	0	6
0	2	0	4	2	0	0	4
1	0	0	2	2	0	1	7
1	0	1	4	2	1	0	7

Continúa

Continuación anexo 3.

Tabla 11. Número más probable para diversas combinaciones de resultados positivos y negativos cuando se utilizan cinco porciones de 10 mL, cinco porciones de 1 mL y cinco porciones de 0.1 mL (Conclusión)

Número de tubos que dan reacción positiva				Número de tubos que dan reacción positiva			
5 de 10 mL cada uno	5 de 1 mL cada uno	5 de 0.1 mL cada uno	NMP	5 de 10 mL cada uno	5 de 1 mL cada uno	5 de 0.1 mL cada uno	NMP
2	1	1	9	5	0	1	30
2	2	0	9	5	0	2	40
2	3	0	12	5	1	0	30
3	0	0	8	5	1	1	50
3	0	1	11	5	1	2	60
3	1	0	11	5	2	0	50
3	1	1	14	5	2	1	70
3	2	0	14	5	2	2	90
3	2	1	17	5	3	0	80
4	0	0	13	5	3	1	110
4	0	1	17	5	3	2	140
4	1	0	17	5	3	3	170
4	1	1	21	5	4	0	130
4	1	2	26	5	4	1	170
4	2	0	22	5	4	2	220
4	2	1	26	5	4	3	280
4	3	0	27	5	4	4	350
4	3	1	33	5	5	0	240
4	4	0	34	5	5	1	300
5	0	0	23	5	5	2	500
5	0	1	30	5	5	3	900
5	0	2	40	5	5	4	1600
				5	5	5	≥1600

9.3 Anexo 3

Tabla 12. Número más probable (NMP) para diversas combinaciones de resultados positivos y negativos cuando se utilizan tres porciones de 10 mL, 1 mL y 0.1 mL (Continuación)

Número de tubos que dan reacción positiva			
3 de 10 mL cada uno	3 de 1 mL cada uno	3 de 0.1 mL cada uno	NMP
0	0	0	<3
0	0	1	3
0	1	0	3
0	2	0	-
1	0	0	4
1	0	1	7
1	1	0	7
1	1	1	11
1	2	0	11
2	0	0	9
2	0	1	14
2	1	0	15
2	1	1	20
2	2	0	21
2	2	1	28
2	3	0	-

Continúa

Continuación anexo 3.

Tabla 12. Número más probable (NMP) para diversas combinaciones de resultados positivos y negativos cuando se utilizan tres porciones de 10 mL, tres porciones de 1 mL y tres porciones de 0.1 mL. (Conclusión)

Número de tubos que dan reacción positiva			
3 de 10 mL cada uno	3 de 1 mL cada uno	3 de 0.1 mL cada uno	NMP
3	0	0	23
3	0	1	39
3	0	2	64
3	1	0	43
3	1	1	75
3	1	2	120
3	2	0	93
3	2	1	150
3	2	2	210
3	3	0	240
3	3	1	460
3	3	2	1100
3	3	3	>2400

9.4 Anexo 4

Tabla 13. Número más probable y límites de confianza de 95% para varias combinaciones de resultados positivos y negativos cuando se usan 10 porciones de 10 mL cada una.

Número de tubos que dan reacción positiva	Número más probable	Límites de confianza de 95% (aproximados)	
		Inferior	Superior
0	<1.1	0	3.0
1	1.1	0.03	5.9
2	2.2	0.26	8.1
3	3.6	0.69	10.6
4	5.1	1.3	13.4
5	6.9	2.1	16.8
6	9.2	3.1	21.1
7	12.0	4.3	27.1
8	16.1	5.9	36.8
9	23.0	8.1	59.5
10	>23.0	13.5	Infinito

9.5 Anexo 5

Tabla 14. Límites máximos permisibles (LMP) de las sustancias orgánicas volátiles

Substancia	LMP (en microgramos/litro)
Carbón tetracloruro	5
Cloruro de vinilo	2
1,2- dicloroetano	5
1,1- dicloroetileno	7
1,1,1- tricloroetano	200
o-diclorobenceno	600
p-diclorobenceno	75
cis-1,2-dicloroetileno	70
trans-1,2-dicloroetileno	100
1,2-dicloropropano	5
Etilbenceno	700
Monoclorobenceno	100
Estireno	100
Tetracloroetileno	5

Continua

10. Productos secundarios de desinfección

10.1 Trihalometanos (THM) son productos secundarios de la desinfección. Son bromoformo; dibromoclorometano; bromodi- clorometano y cloroformo. La suma de las razones entre la concentración de cada uno y su respectivo valor guía no debe superar la unidad. El valor guía se muestra en la tabla 13.

Tabla 15. Valores guía para productos secundarios de la desinfección

Producto secundario	LMP (µg/L)
Bromoformo	100
Bromoclorometano	100
Bromodichlorometano	60
Cloroformo	200

11. Aspectos relativos a radiación nuclear

11.1 Definiciones

11.1.1 Actividad. La actividad de una cantidad de un radionucleido es un estado particular de energía a un tiempo dado, es el cociente dN/dt , donde dN es el valor esperado del número de transiciones nucleares espontáneas desde ese estado de energía en el intervalo de tiempo dt .

11.1.2 Bequerel. Unidad radiométrica utilizada para medir la actividad de una fuente. Se simboliza por Bq y es equivalente a 1 desintegración/segundo.

11.1.3 Dosis efectiva comprometida (H_T). Es la suma de las dosis equivalentes de todos los órganos y tejidos multiplicados por los factores de ponderación (W_T) adecuados.

$$E(t) = W_T H_T(t)$$

donde:

W_T = Factor de ponderación para el órgano o tejido T

H_T = Dosis equivalentes comprometidas del órgano o tejido T

t = Número de años para el que se hizo la integración para la dosis equivalentes comprometidas.

11.1.4 Dosis equivalentes comprometidas para un órgano o tejido. Integral en base al tiempo de la tasa de dosis equivalente sobre el tiempo t en un tejido particular que será recibida por un individuo siguiendo una ingestión de un material radioactivo. Cuando no se da el período de integración t, un período de 50 años está implícito para adultos o uno de 70 años para niños.

11.1.5 Dosis equivalente a un órgano o tejido. La dosis equivalente, H_T, R en el órgano o tejido T debido a la radiación R, está dada por:

$$H_T, R = W_R D_T, R$$

donde D_T, R es la dosis promedio de radiación r en el órgano o tejido T y W_R es el factor de ponderación de la radiación.

11.1.6 Sievert. Unidad dosimétrica utilizada para medir la dosis equivalente y la dosis efectiva. Se simboliza por Sv y es equivalente a 1 J/Kg

11.2 Aspectos radiológicos

a) Asumiendo un promedio de consumo de 2 litros diarios por persona adulta promedio, las concentraciones de radionucleidos en el agua potable deben representar en conjunto una dosis efectiva concentrada menor a 0.1 mSv durante un año.

Por debajo de este nivel, el agua es apta para el consumo humano, sin que sea necesaria ninguna medida para reducir la radiactividad.

Continúa

b) Para garantizar dicha dosis efectiva concentrada, se recomiendan las concentraciones guía de actividad de:

- 0.1 bequerels/litro para radiactividad alfa total
- 1.0 bequerels/litro para radiactividad beta total

c) Si alguna de las actividades es mayor a los anteriores valores de referencia, se deben cuantificar las concentraciones de actividad de cada uno de los radionucleidos emisores de partículas alfa y beta presentes, y determinarse la dosis total correspondiente.

11.2.1 Medición de actividad alfa total

a) La actividad alfa total puede determinarse por diferentes métodos, incluyéndose medición simultánea de actividades alfa y beta total en detectores proporcionales con componentes electrónicos apropiados. El límite de detección del método que se utilice, debe ser lo suficientemente bajo para permitir la cuantificación de la actividad estudiada.

b) Para realizar la medición de actividad alfa por cualquier método, es necesario eliminar los radionucleidos radón-222 y radón-220.

c) Si la concentración de actividad es menor que 0.1 Bq/L, no se requiere de determinaciones adicionales. Si dicho valor es superado, deben cuantificarse los siguientes radionucleidos naturales:

Ra-226, Ra-224, Po-210, Th-232, U-234 y U-238. Dependiendo de la hidrogeología de la localidad, se pueden anticipar los radionucleidos que se analizarán.

d) Si se presume alguna contaminación radiactiva, debe cuantificarse el Pu-239.

e) El cálculo de la dosis debe realizarse adicionándose las concentraciones de actividad beta encontradas.

11.2.2 Medición de la actividad beta total

a) La actividad beta total puede determinarse por diferentes métodos, incluyéndose medición simultánea de actividades alfa y beta total en detectores proporcionales con componentes electrónicos apropiados. El límite de detección del método que se utilice, debe ser lo suficientemente bajo para permitir la cuantificación de la actividad estudiada.

b) Si la concentración de actividad beta total es menor que 1 Bq/L, no se requiere de determinaciones adicionales. Si dicho valor es superado, debe cuantificarse la concentración de actividad del K-40, la cual se sustrae de la beta total. Si después de dicha sustracción la actividad beta es mayor que 1 Bq/L, se deben cuantificar los siguientes radionucleidos artificiales de alta toxicidad, emisores de partículas beta:

Sr-90, Sr-89, Cs-137, Cs-134, I-131 y Co-60. Dependiendo del uso de dichos radionucleidos en la localidad y/o la presunción de alguna contaminación radiactiva por algún radionucleido particular, se pueden anticipar los radionucleidos que se analizarán. Deben analizarse también los radionucleidos naturales Pb-210 y Ra-228.

c) El cálculo de la dosis debe realizarse adicionándose las concentraciones de actividad alfa encontradas.

11.2.3 Evaluación del agua, si la concentración de actividad alfa y/o beta es superior al límite recomendado

a) Si son sobrepasados los niveles de 0.1 Bq/L para radiactividad alfa y/o 1 Bq/L para radiactividad beta total, es preciso identificar y cuantificar las actividades de los radionucleidos específicos. Luego debe estimarse la dosis de cada radionucleido y la suma de las dosis de todos los radionucleidos identificados (exceptuando el potasio-40). Si los resultados cumplen con la siguiente ecuación, no son necesarias otras medidas y el agua es considerada apta para el consumo humano desde el punto de vista radiológico.

Continúa

$$\sum C_i/C_{ri} \leq 1$$

donde:

C_i es la concentración de la actividad medida para el radionucleído

C_{ri} es la concentración de actividad de referencia de ese mismo radionucleído, que con un consumo de 2 litros diarios durante un año, tendrá como resultado una dosis efectiva concertada de 0.1 mSv.

b) Si se sospecha la presencia de radionucleidos emisores de partículas alfa con elevados factores de conversión de dosis puede aplicarse la misma ecuación aditiva cuando la radiactividad alfa y beta total se aproxima a los valores límite de 0.1 Bq/L y 1.0 Bq/L, respectivamente. Cuando la suma es mayor que la unidad en una sola muestra, sólo se sobrepasará el nivel de dosis de referencia de 0.1 mSv si la exposición a las mismas concentraciones medidas continúa durante todo un año.

11.3 Referencias para procedimientos analíticos recomendados

11.3.1 Para determinación de actividad alfa y beta total

Eastern Environmental Radiation Facility, U.S. Environmental Agency Radiochemistry Procedures Manual, 1984.

11.3.1.1 Procedimientos:

- a) 00-01 Radiochemical Determination of Gross Alpha and Gross Beta Particle Activity in water.
- b) 00-02 Radiochemical Determination of Gross Alpha Activity in Drinking water by coprecipitation.
- c) U.S. Department of Health, Education, and welfare. Procedures for Determination of stable Elements and Radionuclides in Environmental Samples, 1965.

11.3.1.2 Procedimientos:

- a) Gross Alpha and Beta Activity in water. Página 3-1

11.3.1.3 Para radionucleidos emisores de partículas beta específicos

Eastern Environmental Radiation Facility, U.S. Environmental Protection Agency Radiochemistry Procedures Manual, 1984.

11.3.2.1 Procedimientos:

- a) Cr-01 Radiochemical Determination of Chromium-51 in water samples.
- b) Fe-01 Radiochemical Determination of Iron-55 in water samples.
- c) H-02 Radiochemical Determination of Tritium in water: Dioxane Method.
- d) I-01 Radiochemical Determination of Iodine-131 in Drinking water.
- Pb-01 Radiochemical Determination of Lead-210 in water and Solid Samples.
- f) Sr-04 Radiochemical Determination of Radiostrontium in water, Sea water and other Aqueous Media.

U.S. Department of Health, Education, and Welfare. Procedures for Determination of Stable Elements and Radionuclides in Environmental Samples. 1965.

11.3.2.2 Procedimientos:

Continúa

Continuación anexo 3.

CONTOR NSO 29 001 14/14

a) Strontium-90, Strontium-89, and Barium-140 in water. Página 3-5.
Tritium in water. Página 3-12

b) Environmental Measurement Laboratory. U.S. Department of Energy. Procedures Manual 1992.
Sr-02 Strontium-90. Página 4.5-1995.

d) Pb-01 Lead-210 in bone, Food, Urine, Feces, Blood, Air, and water. Página 4.5-73

11.3.3. Para radionucleidos emisores de partículas alfa específicas
Eastern Environmental Radiation Facility, U.S. Environmental Protection Agency. Radiochemistry
Procedures Manual. 1984.

10.3.3.1 Procedimientos:
Pu-01 Radiochemical Determination of Plutonium in Ashed Samples, Soil, Coal, Fly, Ash, Ores,
Vegetation, Biota and water.

b) Ra-03 Radiochemical Determination of Ra-226 in Water Samples.

c) Ra-05 Radiochemical Determination of Ra-228 in Water Samples.

d) 00-07 Radiochemical Determination of Thorium and Uranium in Water
Environmental Measurements Laboratory. U.S. Department of Energy. Procedures manual, 1992.

Am-03 Americium in Water, Air Filters, and Tissue. Página 4.5-49.

Po-01 Polonium in Water, Vegetation, Soil, and Air Filters. Página 4.5-84.

Pu-10 Plutonium in Water. Página 4.5-119.

d) Ra-07 Radium-226 in Urine and Water. Página 4.5-162.

- ULTIMA LINEA -

Fuente: NORMA COGUANOR. http://www.ada2.org/sala-prensa/publicaciones/doc_view/28-coguanor-29001-99, Fecha de consulta: 14 de agosto de 2013