

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



**DETERMINACIÓN DE CALCIO, MAGNESIO, SODIO Y POTASIO EN AGUAS DE
CONSUMO HUMANO COMO POSIBLES ELEMENTOS INCIDENTES EN LA SALUD,
EN 9 ESTADOS DE VENEZUELA Y DISTRITO CAPITAL**

**Trabajo Especial de Grado
presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela, por la Br. Anny
Katuska Bastidas Santos.
Para optar al título de
Licenciada en Geoquímica**

Caracas, Febrero 2013

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



**DETERMINACIÓN DE CALCIO, MAGNESIO, SODIO Y POTASIO EN AGUAS DE
CONSUMO HUMANO COMO POSIBLES ELEMENTOS INCIDENTES EN LA SALUD,
EN 9 ESTADOS DE VENEZUELA Y DISTRITO CAPITAL**

Tutores: Profesor Santiago Marrero

Realizado por: Br. Anny Bastidas

Profesor Tommaso Tosiani

Caracas, Febrero 2013



ACTA

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “Determinación de calcio, magnesio, sodio y potasio en aguas de consumo humano, como posibles elementos incidentes en la salud, en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital” presentado por la Br. Anny Katiuska Bastidas Santos, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciada en Geoquímica.

Profesor Santiago Marrero

Tutor

Profesor Tommaso Tosiani

Tutor

Profesora Raiza Fernández

Jurado

Profesor Ramón Montero

Jurado



*“EN EL MUNDO DE LAS IDEAS CIENTÍFICAS, COMO SIEMPRE EN LA VIDA, EL
PROGRESO Y LA VERDAD NO TRIUNFAN DE REPENTE; HAY QUE LUCHAR PARA
CONSEGUIRLOS, MOVILIZAR TODAS LAS FUERZAS, SE REQUIERE POSEER
ASPIRACIONES CONCRETAS CLARAMENTE ORIENTADAS, ENERGÍA, GRAN
CONFIANZA EN LA JUSTEZA DE SU CAUSA Y FIRME CONVICCIÓN EN LA VICTORIA.
TRIUNFA NO LA IDEA ABSTRACTA, INFRUCTUOSA, INACTIVA, SINO LA IDEA
COMBATIVA, ARDIENTE POR NUEVAS BÚSQUEDAS, LA IDEA QUE VAYA ÍNTIMAMENTE
LIGADA A LA PROPIA VIDA Y A SUS PROBLEMAS”*

ALEXANDER FERSMAN



AGRADECIMIENTOS

Agradezco esencialmente a la energía que indiscutiblemente es superior al entendimiento del ser humano, que me ha permitido no solo concluir con este proyecto geoquímico, si no, continuar con la vida misma; a mi familia no sólo la de sangre, sino, aquella que te respeta y goza con tus triunfos y que en momentos aciagos dan una palabra de fortaleza de manera oportuna, a los que a pesar de su ausencia física, lograron transmitir su esencia invaluable, acogida como ejemplo de vida, a tod@s esas personas valiosas mil gracias porque en su conjunto representan los fósforos que encienden mi vida.

Al personal académico, técnico, administrativo, deportivo, cultural y obrero que constituye la Universidad Central de Venezuela, sin duda, han conformado parte importante como enseñanza de vida, no sólo académicamente, sino también en el desarrollo integral como ser humano. A HIDROVEN, sus filiales (Hidrollanos, Hydrocentro, Hidrofalcón, Hidrolara, Hidrolago, Hydrocapital) y otras empresas hidrológicas como: Aguas de Mérida, Aguas de Ejido y Aguas de Yaracuy que operan en nueve estados de Venezuela (Apure, Carabobo, Falcón, Lara, Mérida, Miranda, Vargas, Yaracuy y Zulia) y Distrito Capital, quienes de buena actitud acogieron el proyecto y prestaron toda la colaboración posible para la realización del mismo.



RESUMEN

Este proyecto va en dirección de aportar información sobre la concentración de calcio, magnesio, sodio y potasio que consumen, vía agua potable, las poblaciones, municipios o regiones que utilizan estas aguas, en 9 estados de Venezuela (Apure, Carabobo, Falcón, Lara, Mérida, Miranda, Vargas, Yaracuy y Zulia) y Distrito Capital; para ello, fueron estudiadas 94 muestras de agua para el consumo humano, distribuidas en 47 muestras de agua cruda y 47 muestras de agua tratada, obtenidas de 47 plantas potabilizadoras, tomando en cuenta la incidencia que podría tener el valor de la concentración de los citados elementos en la salud. De esta manera, se determinó la concentración de los elementos Ca, Mg, Na y K, a través de la técnica de espectroscopia de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado (ICP-OES), aplicando el método de las curvas de calibración directa con buena linealidad; obteniendo además, los límites de detección (LOD) y cuantificación (LOQ), los cuales cumplen con el criterio de aceptación adecuado ($LOD \ll LOQ$), asimismo la precisión fue menor a 10% con veracidad del método aceptable.

Es importante señalar que diversos estudios han demostrado que el consumo de aguas blandas, va en detrimento de la salud (WHO, 2009) ocasionando diversas enfermedades, entre las que destacan las cardiovasculares, representando estas la primera causa de muerte en países desarrollados y en desarrollo; en este sentido, se calculó la dureza total, cálcica y magnésica para cada muestra recibida, obteniendo como resultado que las aguas blandas corresponden a los estados Lara (LaHLA24), con el valor más bajo del grupo de muestras 8,76 (mg/L $CaCO_3$), incluyendo Zulia y predominantemente el estado Mérida en su totalidad. En contraste, las aguas muy duras se ubicaron en los estados Lara LaHLA27a con un valor de (695,90 mg/L $CaCO_3$) y Yaracuy YaADY47b cuyo valor es de (510,33 mg/L $CaCO_3$) representando esta la concentración más alta de la dureza total.



INDICE

Contenido	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. REVISION BIBLIOGRAFICA.....	5
3.1 Fundamento teórico.....	5
3.1.1 Red causal.....	5
3.1.2 Mortalidad en Venezuela.....	7
3.1.3 Geología Médica.....	10
3.1.4 Elementos esenciales y tóxicos.....	14
3.1.5 Calcio y magnesio como elementos esenciales.....	16
3.1.6 Calcio y magnesio en aguas de consumo humano.....	20
3.1.7 Calcio, magnesio, sodio y potasio en aguas naturales.....	25
3.1.7.1 Calcio.....	26
3.1.7.2 Magnesio.....	27
3.1.7.3 Sodio.....	28
3.1.7.4 Potasio.....	29
3.1.8 Procesos que controlan la composición de las aguas naturales	29
3.1.9 Aguas de consumo humano	32
3.2 Antecedentes.....	33
4. ZONA DE ESTUDIO.....	40



5.	METODOLOGÍA.....	44
5.1	Etapa de laboratorio.....	44
5.1.1	Recepción de muestras	44
5.1.2	Tratamiento de muestras	46
5.1.3	Replicas A y B.....	51
5.1.4	Determinación de la concentración de cationes.....	52
5.2	Tratamiento estadístico de datos.....	53
6.	PRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	57
6.1	Validación del método determinación de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+} en aguas de consumo humano y análisis mediante la técnica de ICP OES.....	58
6.2	Descripción general de los resultados obtenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+} y los calculados de dureza total, cálcica y magnésica en aguas de consumo humano provenientes de 9 estados de Venezuela y Distrito Capital, mediante la técnica de ICP OES y algunos datos fisicoquímicos facilitados por las plantas potabilizadoras.....	61
6.2.1	Aguas Crudas y tratadas.....	71
6.3	Descripción por estado.....	75
6.3.1	Apure.....	75
6.3.2	Carabobo.....	81
6.3.3	Distrito Capital.....	82
6.3.4	Falcón.....	84
6.3.5	Lara.....	85
6.3.6	Mérida.....	87



6.3.7 Miranda.....	88
6.3.8 Vargas.....	89
6.3.9 Yaracuy.....	91
6.3.10 Zulia.....	92
6.4 Variabilidad en las concentraciones de Calcio, Magnesio y dureza total en aguas de consumo humano, procedentes de 47 plantas potabilizadoras en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital, como posibles elementos incidentes en la salud.....	94
7. CONCLUSIONES.....	100
8. RECOMENDACIONES.....	103
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
10. APENDICES.....	111
APENDICE A: Especificaciones de las plantas de tratamiento de la zona de estudio por estado.....	111
APENDICE B Total de muestras recibidas para este proyecto por las diferentes plantas de tratamiento de la zona en estudio y otras especificaciones.....	116
APENDICE C: Ubicación de las plantas de tratamiento por estado. Modificado de HIDROVEN, Direcciones Estadales Ambientales y Dirección General de Equipamiento Ambiental del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, elaborado por coordinación Sala Situacional DGEA. Versión preliminar sujeta a modificaciones Junio 2008.....	118



APENDICE D: Sistema de producción de agua y área de influencia de HIDROCAPITAL.....	124
APENDICE E: Especificaciones del instrumental utilizado.....	126
APENDICE F: Curvas de Calibración.....	127
APENDICE G: Limites (detección (LOD) y cuantificación (LQD)) calibración.....	128
APENDICE H: Precisión de los análisis.....	129
APENDICE I: Sesgo	131
APENDICE J: Concentración de los elementos analizados y dureza calculada.....	132
APENDICE K: Datos fisicoquímicos proporcionados por algunas plantas de tratamiento de aguas para el consumo humano de 9 estados y Distrito Capital.....	135



INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Red Causal aplicada a enfermedad cardiovascular	7
2. Porcentaje de decesos por enfermedad del corazón en Venezuela, por estado, para personas menores de 65 años en el año 2005.....	9
3. Geología y Salud.	11
4. Tabla Periódica que destaca elementos esenciales para la salud humana y aquellos considerados como tóxicos o no esenciales	14
5. Modelo conceptual de deficiencia y exceso de elementos traza esencial y no- esencial	16
6 Esquema de un sistema de abastecimiento de agua potable.....	33
7 Fuentes de abastecimiento de agua potable por región de la zona en estudio, zonificados por empresas hidrológicas en Venezuela.....	41
8 Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio.....	42
9 Muestras de agua enviadas por las empresas hidrológicas.....	45
10 Equipo de filtración, bomba de succión y envases de polietileno utilizados en la etapa de laboratorio.....	47
11 Esquema generalizado de la metodología empleada.....	50
12 Esquema replicas A de la metodología empleada.....	51
13 Esquema replicas B de la metodología empleada.....	52
14 Histograma de grado de dureza en muestras de aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital.....	62
15 Tipo de dureza en muestras de agua de consumo humano de 9 estados y D.C.....	63



16	Histograma de Tipos de agua de acuerdo al pH en muestras de agua de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital.....	65
17	a) Ca, b) Mg, c) Na, d) K y fuentes de abastecimiento en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital.....	68
18	Dureza total y fuentes de abastecimiento en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital.....	70
19	Cajas graficas de a) Ca, b) Mg, c) Na y d) K en aguas crudas y tratadas de 9 estados y Distrito Capital.....	72
19 ^a	Gráficos de dispersión de a) Ca, b) Mg, c) Na y d) K en aguas crudas y tratadas de 9 estados y Distrito Capital.....	73
20	a) Calcio y b) Magnesio en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital.....	76
21	c) Na y d) K en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital.....	77
22	Distribución de Ca, Mg, Na y K en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital.....	79
23	Dureza total por estado en muestras de agua de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital.....	79
24	Valor mínimo recomendado de dureza Total para un mayor beneficio en la salud y dureza total en las 47 plantas potabilizadoras participes en el proyecto.....	95
25	Valor mínimo recomendado de Calcio para un mayor beneficio en la salud y dureza total en las 47 plantas potabilizadoras participes en el proyecto.....	97
26	Valor mínimo recomendado de Magnesio para un mayor beneficio en la salud y Magnesio en las 47 plantas potabilizadoras participes en el proyecto.....	99



27	Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estado Apure.....	118
28	Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estado Carabobo.....	119
29	Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estado Falcón.....	120
30	Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estados Lara y Yaracuy.....	121
31	Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estados Mérida y Zulia.	122
32	Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estados Miranda, Vargas y Distrito Capital.....	123
33	Sistema de Producción de agua de Caracas. Tomado de mapas y embalses http://www.hidroven.gov.ve	124
34	Área de influencia de Hidrocapital. Tomado de mapas y embalses http://www.hidroven.gov.ve	125
35	Espectrómetro de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado.....	126
36	Curvas de calibración de a) Ca, b) Mg c) Na d) K y e) Ca por ICP-OES y f) ecuación de significancia.....	127
37	Parámetros de calidad calculados en replicas A (repetibilidad) de las muestras a) FaHFA30b, b) FaHFA31a, c) AHLL37a, d)CaHCE39b, e) YaADY45a para determinar la precisión del análisis.....	129
38	Parámetros de calidad calculados en replicas B (reproducibilidad) de las muestras a) MiHCA13a, b) MiHCA13b para determinar la precisión del análisis y c) resultados de la prueba t de la muestra MiHCA13 en aguas crudas y tratadas por elemento.....	130
39	Ecuaciones y datos para calcular la dureza total, cálcica y magnésica.....	134



INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Causas de muerte en Venezuela.....	7
2. Porcentaje de decesos según la causa, por estado, para Venezuela en el año 2004.....	8
3. Ingestas dietéticas de referencia para calcio y magnesio.....	19
4. Principales cationes contribuyentes en la dureza del agua y aniones asociados a estos..	20
5. Clasificación de las aguas en términos de grados de dureza.....	21
6. Criterios de calidad del agua	24
7. Dureza reportada	48
8. Dureza total (mg/L CaCO_3) y pH de algunas plantas potabilizadoras a nivel nacional	49
9. Contraste estadístico en aguas crudas y tratadas por elemento.....	72
10. Valores de: Mediana, MAD, Fondo y orden de abundancia estimado en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital de las plantas potabilizadoras participes en el proyecto.....	78
11. Plantas potabilizadoras de la región Capital. M.A.R.N.R (1997).....	111
12. Plantas potabilizadoras del Estado Mérida. Modificado de Ministerio Del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997).....	112
13. Plantas potabilizadoras del Estado Lara. Modificado del Ministerio Del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997).....	113
14. Plantas potabilizadoras del Estado Carabobo. Modificado del Ministerio Del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997).....	113
15. Plantas potabilizadoras del Estado Zulia. Modificado de Ministerio Del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997).....	114



16	Plantas potabilizadoras del Estado Apure. Modificado de Ministerio Del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997).....	114
17	Plantas potabilizadoras del Estado Falcón. Modificado de Ministerio Del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997).....	115
18	Plantas potabilizadoras del Estado Yaracuy, Modificado del Ministerio Del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997).....	115
19	Total de muestras recibidas por las diferentes plantas de tratamiento de la zona en estudio.....	116
20	Condiciones del espectrómetro de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado del instituto de Ciencias de la Tierra (ICT), Departamento de Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela.....	126
21	Longitud de onda e intervalo de concentración de patrones de las especies químicas analizadas.....	126
22	Resultados de t calculado por elemento para probar la significancia de una correlación lineal y comparar con t critico $t(95\%,3)=3,18$ y $t(95\%,2)=4,30$	127
23	Límites de detección y de cuantificación en muestra.....	128
24	Parámetros de calidad calculados en replicas A y B de las muestras correspondientes para determinar la precisión del análisis.....	130
25	Test de detección del sesgo aplicado a la solución patrón STD_4 para $t(95\%, 8) = 2,31$	131
26	Ecuaciones empleadas para el test de detección del sesgo.....	131
27	Concentración de elementos analizados, durezas calculadas, fuentes de abastecimiento y estado que abastece en muestras de agua para el consumo humano de	



9 estados y Distrito Capital.....	132
28 Datos de pH proporcionados por algunas plantas de tratamiento de agua potable.....	135
29 Datos de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) proporcionados por algunas plantas de tratamiento de agua potable.....	136
30 Datos de Alcalinidad (mg/L) CaCO_3 proporcionados por algunas plantas de tratamiento de agua potable.....	137



1. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades cardiovasculares representan la principal causa de muerte, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, siendo el riesgo cardiovascular la sumatoria de diversos factores dentro de los que destacan, la obesidad abdominal, malos hábitos alimenticios que generan altos niveles de lípidos en la sangre (dislipidemia), el tabaquismo, la hipertensión arterial, la resistencia a la insulina (diabetes), la inactividad física, los factores psicosociales y el abuso del alcohol (Yusuf *et al.*, 2004; Lanas, 2007); sin embargo, estos factores en algunas áreas geográficas, no explican totalmente la variabilidad en la distribución por región de la mortalidad por afecciones del corazón. En este sentido, la Geología Médica se ha ocupado de indagar sobre factores medioambientales como posibles causas de riesgo, entre ellos las propiedades que tienen las aguas para el consumo humano.

La Geología Médica es la disciplina que está relacionada con la influencia de los factores ambientales ordinarios sobre la distribución geográfica de problemas de salud en el ser humano y los animales, esta presenta a la comunidad de geocientíficos la oportunidad de trabajar con un equipo multidisciplinario conformado por investigadores en el área de biomedicina y salud pública, esto contribuye a que el problema sea abordado bajo diferentes enfoques que permiten su entendimiento con el afán de ubicar su fuente para tratar de mitigar o quizá resolver, problemas de salud ocasionados por materiales o procesos geológicos. En enero del 2006 se establece formalmente la IMGA (Asociación Internacional de Geología Médica) cuyo propósito es facilitar la interacción entre los geocientíficos, a escala global, enfatizando en la importancia de los factores geológicos que afectan la salud en humanos y animales.



La deficiencia o exceso de los elementos químicos inciden de manera directa en la salud, por lo que existe una clasificación de elementos para la salud humana; a saber: elementos esenciales y elementos tóxicos. Estos están presentes en nuestro entorno geológico y de acuerdo al ambiente donde se encuentren, un elemento esencial, puede llegar a ser tóxico en su concentración natural.

De este modo, los elementos calcio y magnesio son esenciales, comprobándose que su deficiencia puede causar efectos adversos sobre la salud humana (WHO, 2009). Específicamente la correlación inversa de la dureza en agua potable y su incidencia sobre enfermedades cardiovasculares se ha estado estudiando desde finales de la década de los años cincuenta; a partir de allí, han sido generados más de un centenar de trabajos de investigación en países como: Japón, Suecia, Alemania y Finlandia entre otros. Incluso en países como Taiwán, se demostró que la dureza de las aguas no solo afecta el sistema cardiovascular del ser humano sino que existe un 38% más de riesgo en mortalidad por cáncer colorectal para individuos cuya ingesta de aguas blandas era considerable, por lo que la industria de agua de Taiwán ha estimado estos resultados para el tratamiento de las aguas potables (Yang *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2006; Lou *et al.*, 2007).

En Venezuela no se han realizado estudios que involucren la Geología Médica de manera sistemática; por otra parte, las enfermedades del corazón de acuerdo al anuario del Ministerio de la Salud (2005) representan la primera causa de muerte en el país, seguida de cáncer, cerebrovascular y diabetes, excluyendo homicidios y accidentes, tendencia que permanece de manera similar, de acuerdo al anuario del Ministerio del Poder Popular para la Salud (2006), (2007), (2008) y (2009) en Venezuela. Aun cuando la principal causa de muerte por estado es debida a enfermedades cardiovasculares, se muestra un porcentaje variable en su distribución



(Tosiani, 2008); por tal razón, este estudio tiene como propósito obtener datos sobre las concentraciones de calcio y magnesio en aguas de consumo humano, específicamente a partir de 47 plantas potabilizadoras que operan en 9 estados del país (Apure, Carabobo, Falcón, Lara, Mérida, Miranda, Vargas, Yaracuy, Zulia) y Distrito Capital, las cuales son participes en el proyecto, ofreciendo así una distribución por región cercana a la realidad en cuanto al consumo de los citados elementos, tomando en cuenta la incidencia en la salud que podrían tener sus valores de concentración en las aguas para el consumo humano.

Los resultados obtenidos pueden ser usados como aporte a futuras correlaciones entre las concentraciones de calcio y magnesio o dureza del agua potable con su entorno geológico y con la distribución de la mortalidad por enfermedades cardiovasculares en Venezuela; asimismo, se propuso la obtención de las concentraciones de sodio y potasio que además de reflejar condiciones geológicas, son indicativos de contaminación por la influencia de agroquímicos y de procesos industriales diversos sobre las fuentes de abastecimiento, así como de la eutrofización como consecuencia de la contaminación agropecuaria entre otras influencias antrópicas, estos son algunos de los problemas que la industria de agua potable en Venezuela enfrenta diariamente (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC, 2012); por otra parte este estudio permite establecer el inicio de la articulación entre los entes que inciden directamente en la calidad de agua en Venezuela, salud pública y las geociencias, interacción que permite tener una visión más amplia del problema en vía a tomar decisiones que mejoren la calidad de vida de nuestra población.



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Estudiar la concentración de calcio, magnesio, sodio y potasio en aguas de consumo humano como posibles elementos incidentes en la salud, en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la concentración de Ca, Mg, Na, K y dureza total en aguas de consumo humano antes y después del tratamiento de potabilización en varias plantas potabilizadoras de algunos estados de Venezuela.
- Evaluar la variabilidad en las concentraciones de calcio, magnesio y dureza total en aguas de consumo humano, procedentes de 47 plantas potabilizadoras en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital, como posibles elementos incidentes en la salud.
- Aportar información que pueda ser usada en la elaboración de una base de datos – georeferenciada – sobre el consumo de calcio, magnesio, sodio, potasio y dureza total, vía agua potable, a las poblaciones que se sirven de estas aguas, en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital.



3. REVISION BIBLIOGRAFICA

3.1 Fundamento teórico

En la investigación de enfermedades, especialmente la investigación epidemiológica, busca la comprensión de la aparición de ciertas enfermedades en una población específica, su distribución, factores de riesgo y frecuencia en el tiempo, así como la posible forma de control de la enfermedad. La epidemiología con el propósito de describir y explicar la dinámica de la salud poblacional, ha desarrollado claramente condiciones asociadas a los procesos patológicos que pueden ser calificadas como “causas” de las enfermedades, contribuyendo a la identificación de una complicada red de causas para cada padecimiento, tal descubrimiento fue formalizado desde 1970 por Brian MacMahon, lo que facilitó la identificación de múltiples factores que causan la enfermedad o aumentan el riesgo de la misma, de esta manera se tiene una visión que incluye todos aquellos eventos relacionados directa o indirectamente, obteniendo un enfoque más amplio de la problemática de salud pública (López *et al.*, 2000).

3.1.1 Red Causal es un modelo predominante en la investigación epidemiológica, que tiene como premisa que toda afección es producida por diversos factores de riesgo que ocasionan su origen o incrementan la probabilidad de padecerla, siendo el proceso mismo de la enfermedad a menudo complejo, sin embargo, el afán por descubrir condiciones asociadas a los procesos patológicos ha llevado a la identificación de una compleja red de "causas" para cada padecimiento, siendo una de sus principales ventajas la posibilidad de aplicar medidas correctivas eficaces, aun en ausencia de explicaciones sobre el origen de sus causas de manera completa (López *et al.*, 2000).



La enfermedad cardiovascular representa la primera causa de muerte tanto en países desarrollados como en desarrollo, a la cual se han asociado 9 factores de riesgo potencialmente modificables cuyo impacto es el mismo en todos los grupos étnicos y en todas las regiones en el mundo, estos son: dislipidemia, tabaquismo, diabetes tipo 2, hipertensión arterial, obesidad abdominal, factores psicosociales, patrones dietéticos, actividad física y consumo de alcohol. Específicamente para América Latina, el riesgo atribuible poblacional (RAP) asociado con varios factores de riesgo se clasificó en 3 categorías: factores con consecuencias importantes (RAP de más del 38%), entre ellos, obesidad abdominal, dislipidemia y tabaquismo; factores con influencia moderada (RAP del 12.9% a 33%) como hipertensión, diabetes y falta de actividad física regular y los factores con efecto leve son: consumo de alcohol, depresión y consumo de frutas y vegetales (Yusuf 2004; Lanas, 2007).

Como se observa en la figura 1 la red causal aplicada a la enfermedad cardiovascular, muestra los diversos factores de riesgo a tal afección, donde se incluyen aunque con menos énfasis, el consumo de agua en la dieta diaria como factor medioambiental reciente. De acuerdo al conocimiento sobre diversos estudios epidemiológicos realizados desde la década de los años 50, han encontrado una disminución en la mortalidad por enfermedades cardiovasculares en zonas donde los niveles de dureza en las aguas de consumo humano son altos (concentraciones de calcio y magnesio), así como la asociación de los componentes del agua y la disminución en la presión arterial; sin embargo, es una línea de investigación activa en la que aún no se puede hacer una estimación cuantitativa confiable de riesgo, por presentar ésta ciertas debilidades que repercuten en la idónea interpretación de resultados (WHO, 2009).

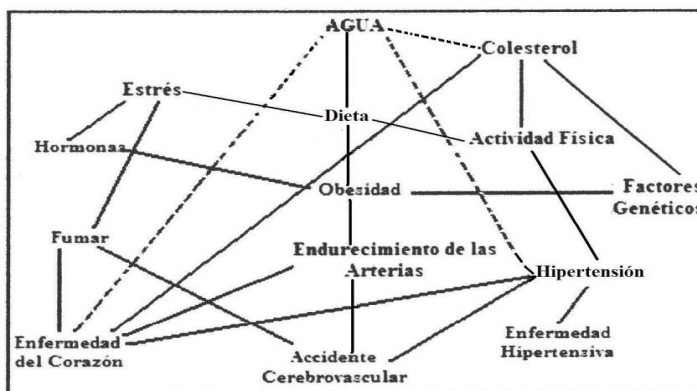


Figura 1: Red Causal aplicada a enfermedad cardiovascular (WHO, 2009).

3.1.2 Mortalidad en Venezuela

Las enfermedades cardiovasculares, representan la principal causa de muerte tanto en países desarrollados como en desarrollo. En Venezuela de acuerdo al Ministerio de Salud (2005) es la primera causa de muerte seguida del cáncer, cerebro-vascular y diabetes, siendo estas cuatro, las más importantes causas de muerte en el país en cuanto a enfermedades no-transmisibles se refiere, esto si se descartan accidentes y homicidios (tabla 1). Esta tendencia se ha mantenido de acuerdo al anuario emitido por el Ministerio del Poder Popular para la Salud (2006), (2007), (2008) y (2009).

Tabla 1: Causas de muerte en Venezuela (Tosiani, 2008).

Causa	Decesos %	Posición
Enfermedades no-transmisibles		
Corazón	21,64	1
Cáncer	15,82	2
Cerebro-Vasculares	7,49	3
Accidentes	7,15	4
Homicidios	6,27	5
Diabetes	6,44	6
Enfermedades transmisibles		
Influenza-Neumonía	2,61	9
Hígado	2,00	10
Infecciones intestinales	1,69	12
VIH	1,26	15
Por protozoarios	0,69	18
Tuberculosis	0,67	19
Septicemia	0,59	20



Tosiani (2008) extrajo de los datos del anuario de mortalidad del Ministerio de la Salud (2005) los casos de fallecidos por estado de las cuatro principales enfermedades no-transmisibles mencionadas anteriormente, donde observó una distribución particular por enfermedad (tabla 2) y destacó los estados de mayor y menor incidencia en cuanto a enfermedades del corazón, siendo estos Trujillo y Bolívar, respectivamente; sin embargo, al filtrar la información por edad para los casos de fallecidos por enfermedad del corazón menores de 65 años, la tendencia se invierte (figura 2), notando de manera inquietante que en el estado Bolívar muere un 40,2% de la población joven; mientras que en el estado Trujillo, apenas el 20,4% de la población joven muere por esta causa.

Tabla 2: Porcentaje de decesos según la causa, por estado, para Venezuela en el año 2004 (Tosiani, 2008).

Estado	Corazón	Estado	Cáncer	Estado	Diabetes	Estado	Cerebro-Vascular
Bolívar	17,13	Portuguesa	11,65	Guarico	3,80	Zulia	5,77
Nva. Esparta	18,14	Cojedes	11,75	Cojedes	3,81	Vargas	6,00
Monagas	18,57	Apure	12,04	Apure	3,99	Cojedes	6,40
Dtto. Capital	19,06	Monagas	12,55	Vargas	4,43	Monagas	6,40
Apure	19,49	Barinas	12,94	Sucre	4,77	Barinas	6,43
Lara	19,66	Sucre	13,08	Miranda	4,89	Bolívar	6,49
Mérida	19,84	Trujillo	13,21	Portuguesa	5,03	Portuguesa	6,49
Anzoátegui	20,03	Táchira	14,03	Barinas	5,40	Dtto. Capital	6,61
Carabobo	20,30	Bolívar	14,06	Dtto Capital	5,48	Yaracuy	6,87
Sucre	20,41	Vargas	14,64	Monagas	5,61	Miranda	7,00
Aragua	20,57	Carabobo	14,75	Aragua	6,01	Trujillo	7,07
Yaracuy	20,99	Anzoátegui	14,95	Anzoátegui	6,22	Carabobo	7,14
Miranda	20,99	Guarico	15,04	Bolívar	6,26	Mérida	7,20
Portuguesa	21,44	Yaracuy	15,45	NACIONAL	6,44	Guárico	7,23
Barinas	21,86	Lara	15,58	Yaracuy	6,52	Táchira	7,30
Cojedes	21,88	Dtto Capital	15,67	Falcón	6,79	NACIONAL	7,49
NACIONAL	21,94	Zulia	15,74	Carabobo	6,83	Lara	7,58
Falcón	23,03	Mérida	15,76	Mérida	6,87	Apure	8,05
Zulia	23,10	NACIONAL	15,82	Lara	6,87	Aragua	8,23
Vargas	23,39	Aragua	16,31	Nva. Esparta	6,95	Anzoátegui	8,25
Táchira	23,53	Nva. Esparta	16,45	Táchira	7,11	Falcón	8,73
Guárico	23,74	Miranda	16,99	Zulia	7,49	Nva. Esparta	9,18
Trujillo	25,07	Falcón	17,15	Trujillo	8,46	Sucre	11,60

Tosiani (2008) señala que las causas de estos decesos no son necesariamente conocidas, y habría que estudiar el resto de los factores de riesgo que inciden en la mortalidad por enfermedades del corazón como la alimentación con exceso de grasas, el estilo de vida, los índices de pobreza y el acceso a la salud entre otras, para lo cual se requiere un equipo multidisciplinario que permita enfocar el problema desde diversos puntos de vista, con el fin de obtener una visión más amplia. Por otra parte, este autor recalca que aunque no es posible especular sobre las causas que afectan en mayor o menor grado a cada estado, se debe reconocer que las características geológicas y geoquímicas de cada región son muy diversas, donde destacó que la población del estado Bolívar se surte de las aguas provenientes de las cuencas de los ríos Caroní, Cuyuní y Orinoco los cuales presentan una concentración de calcio y magnesio muy bajas, específicamente el río Caroní ($\text{Ca} = 0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ y $\text{Mg} = 0,2 \text{ mg.L}^{-1}$), y el río Orinoco ($\text{Ca} = 2 \text{ mg.L}^{-1}$ y $\text{Mg} = 0,7 \text{ mg.L}^{-1}$) (Tosiani, 2007).

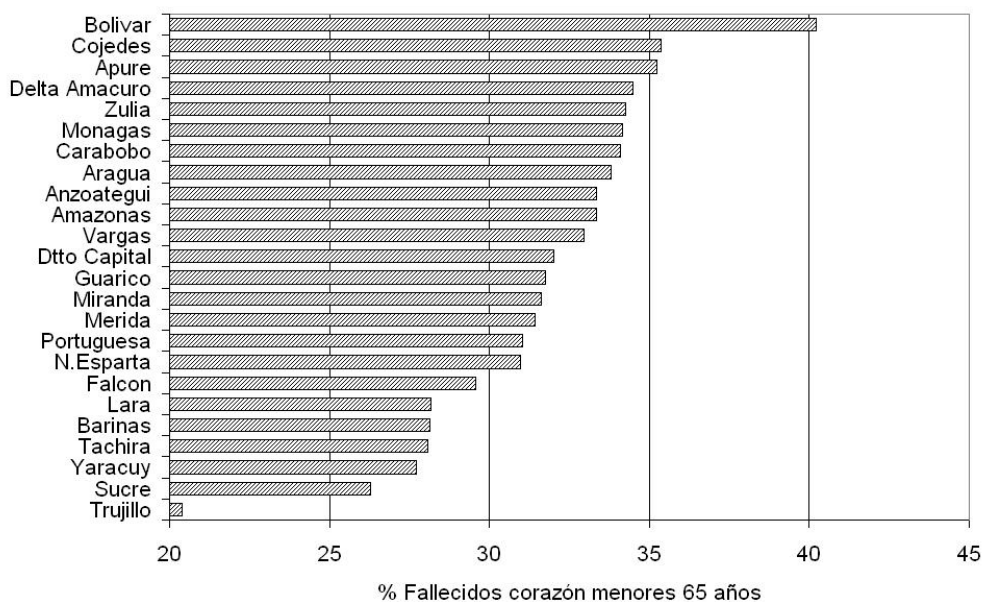


Figura 2: Porcentaje de decesos por enfermedad del corazón en Venezuela, por estado, para personas menores de 65 años en el año 2005 (Tosiani, 2008).



3.1.3 Geología Médica

Entre las diferentes geósferas que conforman la Tierra, existen interacciones que caracterizan la relación entre la vida y nuestro planeta. Las rocas como constituyentes esenciales de la superficie del planeta, compuestas a su vez por diversos ensamblajes mineralógicos en los cuales están presentes los distintos elementos químicos, estos pueden resultar esenciales o tóxicos para la salud de humanos, plantas y animales de acuerdo a su concentración y lugar donde se encuentren. Dentro de los diversos procesos geológicos, la meteorización da paso a la formación de suelos sobre los cuales cultivos y animales constituyen su propio sustento; el agua se mueve de forma continua sobre rocas y suelos como parte del ciclo hidrológico, a su vez gases y polvos presentes en la atmósfera son el resultado de procesos geológicos.

Los elementos químicos pueden entrar al cuerpo humano por diversas vías: ingestión, inhalación o absorción dérmica, de manera continua en la ingesta de alimentos y agua en la dieta diaria, el aire que respiramos y en general, todos los materiales que conforman la tierra; a saber: suelo, sedimentos, polvo, entre otros. Esto ejemplifica la existencia de un enlace directo entre la Geología y la salud debida a la ingestión e inhalación de los elementos químicos inmersos en las diferentes geósferas que conforman nuestro planeta e inevitablemente presentes en la cadena alimenticia, como se resume en la figura 3; por consiguiente, el entendimiento sobre este vínculo es de gran importancia para la subsistencia de la población (Finkelman *et al.*, 2001; Selinus, 2007).

El reconocimiento de que existe una relación afín entre el medio ambiente, en particular los materiales y procesos geológicos, salud humana y animal, ha llevado al reciente desarrollo de un

nuevo campo en la ciencia llamado *Geología Médica*, la cual se define como la ciencia que trata sobre la relación entre los factores geológicos naturales y la salud humana y animal, con entendimiento de la influencia de factores ambientales ordinarios en la distribución geográfica de tales problemas de la salud (Selinus, 2004). Otros autores indican que la Geología Médica es una disciplina dinámica y emergente que involucra diversas áreas: las geociencias, biomedicina, química, biología, bioquímica, veterinaria, agronomía, farmacia, nutrición y salud pública con la finalidad de solventar en gran medida, los problemas de salud que involucran el medioambiente; es decir, el impacto de lo natural en la salud pública, que abarcan diversos puntos, la exposición a niveles tóxicos de elementos traza, la deficiencia de oligoelementos esenciales y la exposición a polvos minerales y a la radiación, entre otros (Bunnell *et al.*, 2007; Gómez y Silva, 2007).

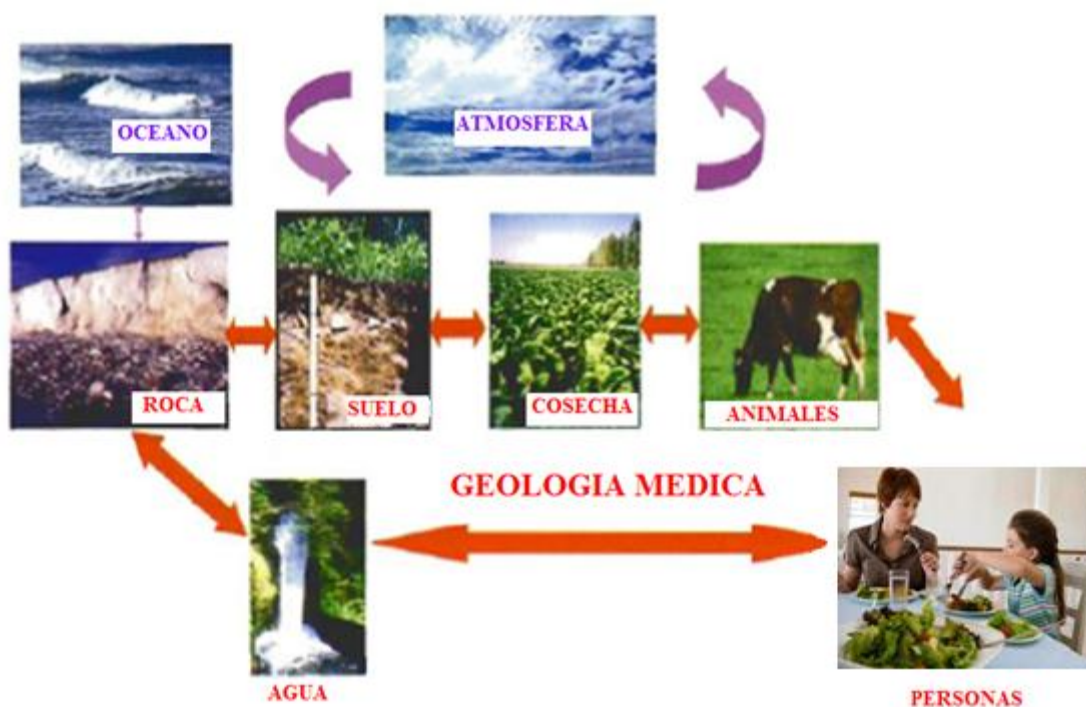


Figura 3: Geología y Salud (Selinus, 2005).



En el año 2000 fue emprendido un proyecto por la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) y la IUGS (Unión Internacional de Ciencias Geológicas) cuyo objetivo fue integrar a los científicos de países desarrollados y en vías de desarrollo, para enfocar la importancia de los factores geológicos que afectan la salud tanto en humanos como animales; no obstante es en enero del 2006 que con la finalidad de facilitar la interacción entre los geocientistas y los investigadores en biomedicina y salud pública, para el estudio de los problemas de salud en humanos y animales ocasionados por materiales o procesos geológicos, cuando se establece formalmente la IMGA (Asociación Internacional de Geología Médica).

A pesar de que la Geología Medica como disciplina es establecida relativamente de manera reciente, el impacto del material geológico en la salud humana y animal ha sido reconocido en el transcurrir del desarrollo de la humanidad. Hipócrates y otros escritores reconocieron que factores ambientales influían en la distribución geográfica de enfermedades humanas; Aristóteles advirtió el envenenamiento por plomo en mineros; Marco Polo en su viaje a China desde Venecia, reportó que en la provincia llamada Su-Chau las bestias que utilizaban para su recorrido eran las nativas, pues las bestias europeas morían al consumir cierta planta venenosa que abundaba en esa zona montañosa de China, además este autor describió los síntomas, hoy día se conoce que el área que fue descrita almacena altas concentraciones naturales en selenio y los síntomas de la enfermedad revelaron que los animales afectados resultaron envenenados con este elemento (Finkelman *et al.*, 2001).



Por otra parte, tanto rocas como minerales y minerales de arcilla han sido usados para el tratamiento de ciertas enfermedades como fiebres, plagas, diarreas, problemas gástricos y dérmicos entre otros; por tanto las interacciones con materiales geológicos pueden resultar beneficiosos proporcionando los nutrientes esenciales o también ocasionar efectos adversos a la salud de humanos, animales o plantas, de acuerdo a la concentración en que se encuentren en la naturaleza (Selinus, 2004).

El moderno interés de esta ciencia se remonta al siglo XIX, al concluir que diminutas cantidades de muchos elementos inorgánicos son necesarias para la salud en humanos y otros mamíferos; sin embargo, su exceso puede resultar perjudicial y hasta peligroso. Para dar cita solo a algunos de estos elementos, una de las primeras correlaciones fue la del yodo con el bocio humano y cretinismo: ambientes alejados de los océanos tienen muy poco yodo en sus suelos y aguas causando que las sustancias bociógenas se incrementen por lo que la enfermedad tiende a agravarse (Selinus, 2004). Asimismo, el fluoruro contenido en las aguas de consumo humano y su uso en la protección de la caries dental fue reconocido en ciertas concentraciones; sin embargo, su exceso puede causar fluorosis en el esmalte o fluorosis esquelética, de este modo es indicado que de 0,7-1,2 mg/L en agua potable es idóneo para el fortalecimiento de los huesos y la disminución de caries dental, mientras que el límite máximo permitido por la OMS es de 1,5 mg/L, pues mucho mayor a este valor pudiese causar fluorosis.

Por su parte, el selenio es un elemento esencial que tiene funciones protectoras antioxidantes características de la regulación de la hormona tiroidea; no obstante, la deficiencia del selenio en suelos, causa daño fisiológico severo, tal como cardiomiopatía juvenil y anormalidades

3.1.4 Elementos esenciales y tóxicos

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	P	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

ESSENTIAL

TOXIC

14



La distribución de los elementos químicos en la superficie de la tierra no es de manera igualitaria o uniforme, cuando la abundancia de los elementos tiende a tener altas concentraciones puede causar niveles tóxicos o si se encuentran en bajas concentraciones causa deficiencia en los mismos, tal desbalance puede inducir serios problemas de salud en la población que los circunda. De los elementos conocidos como esenciales para la vida de plantas, animales y humanos se encuentran Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Co, Cu, Zn, P, N, S, Se y Mo; por otra parte, existen elementos que no tienen una estricta función biológica y son generalmente no esenciales o tóxicos en humanos, entre ellos se incluyen As, Cd, Pb y Hg (Selinus, 2007).

Un elemento es esencial cuando está consistentemente definida su presencia en todo el tejido de la vida saludable dentro de una familia zoológica, cuando los síntomas de deficiencia son notados por su remoción, estos desaparecen cuando el elemento es devuelto al tejido y cuando dichos síntomas se atribuyen a los distintos defectos bioquímicos a nivel molecular (Dissanayake y Chandrajith, 1999). Estudios sobre toxicidad de elementos esenciales indican que un bajo abastecimiento de estos lleva a la deficiencia; mientras que óptimas condiciones de crecimiento, salud y reproducción son el resultante de un abastecimiento suficiente, así mismo un exceso de éste ocasiona efectos tóxicos y letales al organismo (Förestner y Wittman, 1981); es decir, tanto la deficiencia como el exceso de abastecimiento del elemento tienen efectos que van en detrimento del organismo, tal como se aprecia en la figura.5.

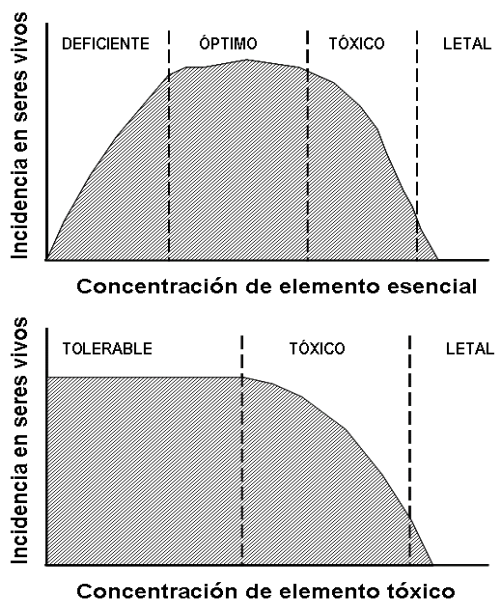


Figura 5: Modelo conceptual de deficiencia y exceso de elementos traza esencial y no-esencial (Förestner y Wittman, 1981).

3.1.5 Calcio y magnesio como elementos esenciales

Tanto el calcio como el magnesio son elementos esenciales, debido a su presencia en todo el tejido de la vida saludable dentro de una familia zoológica, dichos elementos corresponden a los iones metálicos más móviles y ampliamente distribuidos en el organismo.

El calcio funge como elemento estructural dominante en el cuerpo humano, abarcando sobre el 99% en huesos y dientes, el 1% restante interviene en funciones metabólicas, participando así en procesos fisiológicos vitales como la coagulación de la sangre, la contracción de los músculos y la transmisión de impulsos en el sistema nervioso. El consumo insuficiente de calcio tiene consecuencias adversas sobre la salud, es asociado a tener un mayor riesgo de padecer osteoporosis, litiasis renal (cálculo en los riñones), cáncer colorectal, hipertensión, accidente cerebro vascular, enfermedad arterial coronaria, resistencia a la insulina y obesidad (Dissanayake y Chandrajith, 1999; WHO, 2009).



El magnesio representa el cuarto catión más abundante en el cuerpo humano, participa principalmente en funciones de la célula, es un cofactor de alrededor de 350 enzimas implicadas en el metabolismo de la energía, siendo participe en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos y es necesario para la transmisión de impulsos nerviosos, contracciones musculares y en la sensibilidad de la insulina; además de ser esencial en la función cardiovascular. Bajos niveles de magnesio en el cuerpo humano, es asociado a padecimientos como hipertensión, enfermedades cardiacas coronarias, arritmias cardiacas, preeclampsia, aterosclerosis y diabetes tipo I. Datos disponibles sugieren que la privación del magnesio ocasiona un desequilibrio en la incorporación del calcio en el tejido y puede haber riesgo creciente de calcificación suave (Dissanayake y Chandrajith, 1999; WHO, 2009).

No solo la deficiencia de calcio y magnesio resulta adversa a la salud sino también su exceso, ocasionando hipercalcemia e hipermagnesemia en el organismo respectivamente. La hipercalcemia es asociada a gran morbilidad y hasta mortalidad cuando no es diagnosticada y tratada a tiempo, su manifestación incluye síntomas que afectan diversos órganos, de este modo la disfunción neuromuscular es reflejada en síntomas como depresión, confusión, irritabilidad, dificultad para concentrarse, pérdida de memoria, paranoia, alucinaciones, somnolencia, letárgica y coma. Hay además, debilidad muscular, ataxia (descoordinación del movimiento del cuerpo), disartria (trastorno del habla atribuible a lesión del sistema nervioso central y periférico), trastornos visuales e hiperreflexia osteotendino (aumento o exaltación de reflejos profundos) y el deterioro de la función renal con la formación de cálculos renales, entre otros (WHO, 2009).



La hipermagnesemia conduce a la disminución de la transmisión neuromuscular y electroconducción cardíaca. El cuadro clínico de estos trastornos neuromusculares es generalizado y progresivo, siendo sus manifestaciones parálisis muscular que incluye la vejiga y el intestino, náusea, vómito, diarrea, letargo, confusión, depresión respiratoria, ausencia de reflejos osteotendinosos, hipotensión, bradicardia (descenso en la frecuencia cardíaca) y paro cardíaco. Todos estos efectos empeoran cuando se agrega hipocalcemia; sin embargo, la principal causa de la hipermagnesemia es la insuficiencia renal asociada a una capacidad significativamente menor de excretar magnesio (WHO, 2009).

La influencia de los elementos calcio y magnesio en el organismo es irrefutable, esta ha sido respaldada por diversos estudios realizados desde hace 5 décadas, tanto en humanos como animales, lo que ha llevado a destacar la importancia del contenido de calcio y magnesio que el ser humano debe consumir en su dieta diaria, vía alimentos, agua potable o por suplementos específicos, de acuerdo a su requerimiento. De esta manera la recomendación de estos nutrientes es obtenida a partir de diversos enfoques, expresándose en la ingesta diaria recomendada que refleja el promedio diario suficiente para satisfacer los requerimientos nutricionales de casi todos los individuos (97 y 98%) en una etapa de la vida y/o por género, así como también la ingesta adecuada del elemento que refleja el promedio de las ingestas observadas de individuos aparentemente sanos en un subgrupo de interés determinado (WHO, 2009), tal como se puede observar en la tabla 3, cuya ingesta dietética recomendada es reportada por el Instituto Estadounidense de Medicina IOM (1997).

Tabla 3: Ingestas dietéticas de referencia para calcio y magnesio (WHO, 2009).

Grupo	Ingesta de Calcio mg/día	Ingesta de Magnesio mg/día		
	AI	AI	EAR	RDA
0-6 Meses	210	30		
7-12 Meses	270	75		
1-3 Años	500		65	80
4-8 Años	800		110	130
9-13 Años	1300		200	240
14-18 Años	1300		340/300 ^a	410/360 ^a
19-50 Años	1000		330/255 ^a	400/310 ^a
>50 Años	1200		350/265 ^a	400/310 ^a
Embarazo				
<18 Años	1300		335	400
19-30 Años	1000		290	350
31-50 Años	1000		300	360
Lactancia				
<18 Años	1300		300	360
19-30 Años	1000		255	310
31-50 Años	1000		265	320

^a Hombre/Mujer; AI= Ingesta Adecuada; EAR= Requerimiento promedio Estimado; RDA= Ingesta Diaria Recomendada

Una dieta rica en calcio, magnesio, potasio, fibra y reducida en sodio y grasas saturadas, conducen a que el riesgo cardiovascular disminuya; en este sentido, el límite superior de consumo recomendado de sodio por la asociación americana del corazón, es de 2300 mg/d en un nivel de energía de 2100 Kcal; además, también recomiendan en cuanto a los nutrientes establecidos por las guías alimentarias para los estadounidenses (2005) un consumo de calcio de 1240 mg/d, magnesio de 497 mg/d y potasio de 4673 mg/d (Swain, 2008).

La ingesta diaria recomendada de nutrientes varía entre los organismos, en muchos casos no está claramente definida y son adaptaciones que varían notablemente por edad, sexo y requerimiento específico, ya que el efecto biológico de un nutriente depende de su biodisponibilidad; por otra parte, los nutrientes inmersos en el agua se encuentran en forma iónica, lo que hace que tengan mayor tendencia a ser absorbidos por el tracto intestinal humano. Diversos estudios demostraron que la absorción intestinal del calcio en medio líquido o agua mineral, es tan eficaz o más



efectiva en comparación con la de productos lácteos, incluso evidencias estadísticas demostraron que la absorción del calcio en agua mineral es significativamente mayor que en productos lácteos; asimismo en cuanto al magnesio, es conocido que su biodisponibilidad es mayor en agua que a través de los alimentos, lo que hace que el agua sea una fuente mineral importante por lo que su relevancia clínica es mayor (National Institute of Public Health, 2003; WHO, 2009).

3.1.6 Calcio y magnesio en aguas de consumo humano

Tanto el calcio como el magnesio rara vez se evalúan de manera particular en agua potable, sino generalmente a través del parámetro fisicoquímico de dureza, aunque diversos cationes y aniones influyen en la dureza del agua. En la tabla 4 se muestra el orden de abundancia relativa de los cationes que contribuyen con la dureza en aguas naturales, debe ser resaltado que la dureza del agua no es causada por una única sustancia, sino por una variedad de iones metálicos en solución en la que destacan iones polivalentes de estroncio, hierro y manganeso; sin embargo se presentan de manera predominante los iones calcio y magnesio, por tanto la dureza del agua es definida como el total de la suma de las concentraciones de iones de calcio y magnesio expresadas como equivalentes de alcalinidad o CaCO_3 en unidades de mg/L (Sawyer y McCarty, 1978).

Tabla 4: Principales cationes contribuyentes en la dureza del agua y aniones asociados a estos (Sawyer y McCarty, 1978).

Cationes causantes de dureza	Aniones
Ca^{2+}	HCO_3^-
Mg^{2+}	SO_4^{2-}
Sr^{2+}	Cl^-
Fe^{2+}	NO_3^-
Mn^{2+}	SiO_4^{2-}



La dureza del agua es el producto del continuo movimiento y de su poder de disolución sobre rocas y suelos como parte del ciclo hidrológico; así el valor de la dureza en general, varía de lugar en lugar reflejando la naturaleza de la formación geológica con la cual han tenido contacto. Las aguas son clasificadas en términos de variación de dureza en aguas blandas, moderadamente duras, duras y muy duras de acuerdo al contenido de CaCO_3 como se indica en la tabla 5.

Tabla 5: Clasificación de las aguas en términos de grados de dureza (Sawyer y McCarty, 1978).

mg/L CaCO_3	Grados de dureza
0-75	Blanda
75-150	Moderadamente dura
150-300	Dura
> 300	Muy Dura

Debido a la escasa disponibilidad de los datos, no existe un valor específico en el área de la salud que considere la relación entre la dureza del agua y las enfermedades cardiovasculares, esto no ha permitido que se concluya sobre dicha relación de manera formal (Selinus, 2005). Sin embargo, en algunos casos los consumidores toleran una dureza mayor a 500 mg/L, no obstante se ha determinado que valores superiores a 200 mg/L CaCO_3 en interacción con otros factores ocasionan incrustaciones en las instalaciones de tratamiento y en el sistema de la red de distribución de agua potable. Aguas con dureza menor a 100 mg/L (agua suave) resultan corrosivas para las tuberías, esto ocasiona la disolución del cadmio, plomo, y otras sustancias tóxicas en el sistema de plomería. De cualquier manera no se ha establecido un valor de referencia, pues los niveles de consumo no son peligrosos para la salud, solo pudiesen afectar la



aceptabilidad en aspectos del agua de consumo como sabor, olor y aspecto (Yang, 1998; WHO, 2006; WHO, 2011).

Según Comisión Venezolana de Normas Industriales Nacionales (COVENIN 1982) y las normas oficiales para la calidad de agua en Venezuela en su Decreto 883 de la Gaceta Oficial de la República de Venezuela año CXXIII Caracas, lunes 18 de Diciembre de 1995 n° 5021 extraordinario Presidencia de la República, la dureza en las aguas tiene una concentración máxima admisible de 500 mg/L (tabla 6). Esta es generalmente evaluada en atención a la obstrucción de las tuberías en la red de distribución de agua potable (por lo que no se norma un límite inferior) y no si va en detrimento o en beneficio de la salud pública (National Institute of Public Health, 2003). Por otra parte en el modelo clínico tradicional de intervención al paciente, el foco principal es el diagnóstico y tratamiento de una enfermedad, lo que permite la intervención pero sin ningún control previo de la misma, dejando de atacar la fuente del problema antes de que este ocurra (International Medical Geology, 2004).

El valor gustativo del ion calcio se encuentra entre (100 y 300) mg/L dependiendo del anión asociado, pues existen pruebas que el calcio asociado a un contraión (principalmente sulfato o bicarbonato) afecta en menor medida a la retención del calcio absorbido. Resultados de un estudio aplicado a un grupo de jóvenes sanos bajo el consumo de agua mineral alta en calcio con un valor de 344,7 mg/L concluyó que consumir varias veces agua mineral al día podría compensar como un suplemento de calcio, además de proporcionar la hidratación adecuada y otros beneficios.



En cuanto al ion magnesio, luego de un estudio aplicado a un grupo de mujeres bajo el consumo de agua mineral rica en magnesio (110 mg/L) algunos investigadores concluyeron, que el uso regular del consumo de agua mineral rica en este elemento podría ser un buen aporte a los requerimientos de magnesio para el ser humano; no obstante, otros estudios indicaron de manera general, un beneficio mayor en la salud cuando se consumen concentraciones mayores a 10 mg/L de magnesio en agua potable; sin embargo, solo se ha establecido que su concentración adecuada es inferior al ion calcio. Un nivel óptimo de concentración de calcio y magnesio no es fácil de determinar, puesto que los requisitos de salud pueden no coincidir con los requerimientos técnicos (National Institute of Public Health, 2003; WHO, 2009; WHO, 2011).

Diversos estudios realizados desde finales de los años cincuenta en países como Japón, China, Taiwán, Suecia, Finlandia, entre otros, fue examinada la posible asociación entre la dureza del agua potable y sus efectos en la salud, específicamente su impacto en la mortalidad causada por enfermedades cardiovasculares, así como la asociación negativa entre la enfermedad cardiovascular y el magnesio en el agua potable, aunque tal asociación no demuestra necesariamente causalidad si es consistente con los efectos bien conocidos del magnesio como elemento cardioprotector en la función cardiovascular (WHO, 2009).

Dada la extrema variabilidad en las necesidades de consumo de calcio y magnesio en agua potable, que no se basa únicamente en diferencias en el metabolismo, sino también en las condiciones ambientales, ritmo de vida, actividad y volumen de agua consumida, entre otras variantes, no hay un único nivel en la ingesta de agua que asegure una adecuada hidratación y una salud óptima para todas las personas aparentemente sanas sometida a todos los aspectos y



condiciones ambientales, por tal razón el interés en el consumo de agua potable como fuente de minerales ha motivado a la realización de estudios sobre la contribución potencial alimenticia del calcio y del magnesio (WHO, 2009).

Tabla 6: Criterios de calidad del agua (Barrientos, González y Urbani, 2000; Hernández, 2007).

Variable	COVENIN (1982)	OMS (1984)		Reglamento técnico sanitario Europa RD1138/1990		Decreto Nº883 (1995)	OMS (2011)
	CMA	A	P	Nivel guía	CMA	limite	
pH	6,5-8,5	7-8,5	9,5	6,5-8,5	9,5	6-8,5	ç
T, Agua (° C)	—	10	25	12	25	—	—
STD (ppm)	—	500	1500	—	—	1500	ç
Alcalinidad Total(*)	500	—	—	30 (cme)	—	—	—
Dureza Total (*)	500	—	—	60 (cme)	—	500	ç
Cloruros (ppm)	250	200	—	25	200	600	ç
Calcio (ppm)	200	75	200	100	—	200	ç
Magnesio (ppm)	30 ^a	50	150	30	50	70	ç
Sodio (ppm)	—	—	200	20	150	140	ç
Potasio (ppm)	—	—	—	10	12	20	—
Sílice (mg/L)	50	—	—	—	—	—	—
Sulfatos (mg/L)	250	250	—	25	250	400	ç
Fosfatos (mg/L)	0,5	—	—	—	—	—	—

*(mg CaCO₃/L)

^a Si la concentración de sulfatos es inferior a 250mg/L, pueden permitirse hasta 150mg/L de Magnesio

CMA: concentración máxima admisible

A: Aceptable

P: Máximo permisible

ç: Se presenta en el agua de consumo en concentraciones mucho menores que las que pueden producir efectos tóxicos.

Cme: concentración mínima exigida en aguas que hayan sido sometidas a un tratamiento de ablandamiento

Como se ha indicado el estudio de la dureza del agua potable y su relación con las enfermedades cardiovasculares se remonta desde la década de los 50 hasta nuestros días. La mayoría de estos estudios han determinado la existencia de una relación inversa entre la dureza del agua de consumo humano y las enfermedades cardiovasculares; es decir, a mayor concentración de dureza en el agua de consumo humano, menor incidencia (morbilidad) y/o mortalidad por enfermedades cardiovasculares. Por otra parte, desde los años 60 estudios experimentales y epidemiológicos en seres humanos y animales indicaron que el consumo de agua desmineralizada o blanda puede llevar a una mayor incidencia de enfermedades producto de la excreción de algunos nutrientes en el organismo; es decir, las aguas blandas no solo ocasionan corrosión en



tuberías, disminuyendo su vida útil, sino que ocasionan situaciones adversas en la salud del ser humano; además, la pérdida de magnesio y calcio en alimentos es menor cuando se cocina con aguas ricas en dichos nutrientes (Rubenowitz, 1996; WHO, 2009), por tanto no solo se debe prestar atención a los límites máximos en las concentraciones de nutrientes, específicamente calcio y magnesio a través del agua de consumo humano, sino de sus requerimientos mínimos.

3.1.7 Calcio, magnesio, sodio y potasio en aguas naturales

Diversos factores influyen en la composición química de las aguas naturales; a saber: el clima y la disolución de rocas por las cuales discurren los cursos de agua, esto a su vez involucran procesos de meteorización, erosión, formación de suelo, precipitaciones, gases y aerosoles de la atmósfera, los efectos bioquímicos y en general todos los factores ambientales a la cual están sometidas las aguas, encontrándose inmersas en un ambiente químico natural cambiante; además existen otros factores como el tiempo de contacto con el sustrato rocoso, longitud del recorrido, sin olvidar los factores antrópicos que modifican continuamente y de manera notable, la composición química de dichas aguas naturales (Custodio, 1976; Hem, 1986).

Las aguas naturales representan un sistema de cierta complejidad, no homogéneo, que pudiese presentarse en diversas fases, ya sea en forma acuosa, gaseosa o sólida, como resultado de un proceso de interacciones complejas por lo que su composición química es variable. De manera general en aguas ácidas hay mayor disolución de minerales que en aguas alcalinas y el anhídrido carbónico disuelto es relevante en la regulación del pH, aunque el K^+ tiende a ser irreversiblemente retenido por las arcillas tipo illita y glauconita, por lo que su concentración es muy baja en aguas naturales; sin embargo, en general se establecen ciertos criterios, donde la



mineralización de las aguas de circulación regional tienden a ir en aumento y su evolución normal es que sucesivamente vayan dominando ciertos iones en solución como: $\text{CO}_3\text{H}^- \rightarrow \text{SO}_4^- \rightarrow \text{Cl}^-$ y $\text{Ca}^{++} \rightarrow \text{Mg}^{++} \rightarrow \text{Na}^+$ y en menor medida el K^+ , estos cationes están en ocasiones débilmente unidos a las estructuras silicatadas, por lo que pasan al agua con facilidad con ayuda de factores como el pH, nivel de saturación y la temperatura del agua (Custodio, 1976; Stumm y Morgan, 1996).

3.1.7.1 Calcio generalmente es el ion divalente más dominante en aguas naturales, frecuentemente presente en diversos minerales formadores de una gran variedad de rocas ígneas y metamórficas especialmente en cadenas de silicatos tipo piroxeno, anfíbol y plagioclasas; así como en rocas sedimentarias carbonáticas y sus minerales calcita, aragonito (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Otros minerales que también contienen calcio son el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la anhidrita (CaSO_4), y más raramente, fluorita (CaF_2). Igualmente, en areniscas y en otras rocas detríticas el calcio está presente como cemento entre partículas o relleno parcial o intersticial. Este elemento es también un componente de algunos tipos de zeolitas y montmorillonita (Hem, 1986).

El comportamiento del ion Ca^{2+} en aguas naturales está dominado por la disponibilidad de las fases más solubles de este catión, limitadas por el equilibrio de carbonatos que implica la cantidad de CO_2 disuelto en las aguas y la temperatura del sistema; asimismo, el intercambio iónico que se presenta en la superficie de aluminosilicatos y otros minerales, es participe de la cantidad de calcio disuelto en las aguas naturales.



En aguas de río se consideran las fluctuaciones del pH ocasionadas por los organismos fotosintéticos, de este modo las concentraciones de calcio presente en aguas naturales es variable, sin embargo se estima entre 10 y 250 mg/L; no obstante otros autores señalan valores de 200 y 300 mg/L, aunque de acuerdo al contenido de sustancias disueltas en las aguas naturales de interés pudiese llegar a 600 mg/L de calcio (Custodio, 1976; Hem, 1986). Este catión generalmente no se relaciona con fuentes de contaminación antrópica por lo que no se reporta ninguna concentración en cuanto a su nocividad y toxicidad, su mayor inconveniente es la producción de incrustaciones en el sistema de tuberías y en la red de distribución de agua potable y calderas, entre otros, como consecuencia de la precipitación de carbonatos en estas aguas.

3.1.7.2 Magnesio la fuente más común de magnesio son los carbonatos presentes en rocas sedimentarias, en magnesita e hidromagnesita, así como presente en el hidróxido de brucita, y en general mezclas de magnesio con carbonato de calcio como la dolomita y la caliza, donde por lo general se encuentra en cantidades importantes. También está presente en rocas ígneas y metamórficas a través de minerales ferromagnesianos como el olivino, piroxeno, anfíbol, micas de color oscuro, la clorita y la serpentina. La cantidad de magnesio en las aguas naturales dependerá de la disponibilidad del mineral y la cantidad de CO₂ disuelto, por otra parte el intercambio catiónico del magnesio es similar al del calcio, ambos están fuertemente adsorbidos por minerales de la arcilla y otras superficies, además de las variantes ya mencionadas a las cuales están sometidas las aguas naturales inmersas en un ambiente químico natural cambiante (Hem, 1986).



De la misma manera que el calcio, en cuanto a la toxicidad, el magnesio contribuye con la dureza del agua y a un pH elevado tiende a incrustarse en las tuberías, calderas, entre otros, en presencia de centenares de ppm el agua ofrece un sabor amargo y tiene propiedades laxantes; sin embargo, no hay una concentración precisa para esto, en aguas naturales se estima un valor entre 1 y 100 mg/L, sujeto a variaciones, de acuerdo a la cantidad de sales disueltas (Custodio, 1976; Hem, 1986).

3.1.7.3 Sodio la mayor fuente de sodio en aguas naturales es producto soluble proveniente de la descomposición de minerales del grupo de los feldespatos, específicamente la serie de las plagioclasas albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)-anortita ($\text{Ca Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) y en evaporitas como la halita (NaCl). El sodio es retenido por adsorción en la superficie de ciertos minerales, especialmente los minerales de arcilla que tienen gran capacidad de intercambio catiónico, aunque este proceso de intercambio en sistemas de agua dulce tienden a extraer los iones divalentes de la solución y reemplazarlos con los iones monovalentes. Sin embargo, la interacción entre los sitios de superficie y sodio, y con iones monovalentes en general, es mucho más débil que las interacciones con los iones divalentes. La solubilidad de las sales de sodio en aguas naturales está fuertemente influenciada por la temperatura, así como por la precipitación atmosférica (Hem, 1986).

La concentración de sodio en el agua natural puede tener un intervalo muy amplio, desde menos de 1 mg/L en áreas de alta precipitación hasta 150 mg/L en aguas dulces 1000 a 2000 mg/L de sustancias disueltas) y miles de mg/L en aguas que están en contacto con depósitos evaporíticos;



sin embargo, las actividades humanas tienen injerencia significativa en la concentración de sodio en aguas naturales, pues es ampliamente usado en diversos procesos industriales.

3.1.7.4 Potasio los minerales más comunes como fuente de potasio en aguas naturales son los feldespatos como la ortosa (KAlSi_3O_8). En sedimentos se encuentra como constituyente principal de las micas, así como en arcillas en formación, tal es el caso del paso de montmorillonita a illita donde es absorbido de manera muy poco reversible, en rocas evaporíticas pueden estar localmente formando capas de sales potásicas como silvita (KCl). En general los minerales que contienen potasio son resistentes a los procesos de meteorización y su concentración es mucho menor que la concentración de sodio en aguas naturales; por otra parte, existen indicios de que los factores biológicos pueden ser importantes en el control de la disponibilidad de potasio para la solución en aguas de los ríos y aguas subterráneas, ya que el potasio es absorbido por plantas y retornado al sistema cuando mueren. La concentración de potasio en aguas naturales no excede de 10 mg/L, aunque puede ser alterada por factores antrópicos, específicamente contaminación industrial, minera y agrícola (mezcla de fertilizantes) (Custodio, 1976; Hem, 1986).

3.1.8 Procesos que controlan la composición de las aguas naturales:

Las aguas naturales se encuentran constantemente sometidas a un ambiente químico natural cambiante, donde tienen cabida diversas reacciones químicas gobernadas por factores cinéticos, algunas características físicas y en general consideraciones termodinámicas, además de la actividad biológica inherente del lugar, que junto con la composición del sustrato por donde discurren estas aguas proporcionan su composición química, aunado a esto, factores antrópicos son participes en la variación en su composición.



Las reacciones de disolución son unas de las más importantes que determinan la composición de las aguas naturales, están en función del pH, donde es relevante la presencia de anhídrido carbónico disuelto para mantenerlo, también la temperatura del agua, además del déficit de saturación. El pH en aguas naturales es variable oscilando entre 0 en aguas fuertemente acidas en regiones volcánicas o provenientes de la contaminación de aguas en minas y un $\text{pH} \geq 10$ en zonas alcalinas donde se encuentran carbonatos en solución; sin embargo, es frecuente que el pH de las aguas naturales varía entre 4 y 9, siendo un parámetro fisicoquímico imprescindible en la toma de muestras de agua. En general el proceso de disolución es más rápido en aguas acidas que en aguas alcalinas, por otra parte a mayor tiempo con la superficie de contacto y el agua, unida a temperaturas elevadas es más probable que la disolución de sales aumente hasta alcanzar sus respectivos productos de solubilidad; algunos procesos de disolución como carbonatos $\text{CaCO}_{3(s)}$ y $\text{CO}_{2(g)} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_{3(aq)}$, son fácilmente reversibles en muchos sistemas naturales (Hem, 1986; Custodio y Llamas, 1976; Mason, 1960).

Reacciones de intercambio iónico o sorción-desorción resultan fácilmente reversibles y de gran utilidad para explicar procesos que ocurren en los minerales de arcilla como caolinita, montmorillonita, illita, vermiculita, entre otros. Estas reacciones afectan principalmente a los cationes Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} entre otros, mientras el K^+ tiende a ser fijado irreversiblemente en arcillas tipo illita, cuanto mayor es el estado de división de esos materiales, mayor es la facilidad y rapidez con que se realiza el intercambio iónico, por ejemplo si una arcilla que contiene sodio se traslada a un medio donde domina el ion Ca^{2+} , cada par de Na^+ que pase a la solución por su labilidad será reemplazado por un ion Ca^{2+} , así la solución se disminuye en iones Ca^{2+} y se enriquece en iones Na^+ , hasta que este llegue al equilibrio $\text{Na}_2\text{X} + \text{Ca}^{2+} = \text{CaX} + 2\text{Na}^+$. Esto



también ocurre con Mg^{2+} cuyo proceso se realiza en el ablandamiento del agua dura a través de resinas sintéticas, las aguas blandas tienden a aumentar el pH por la mayor disolución de calizas, ocasionando generalmente cambios en el contenido de bicarbonatos y dióxido de carbono libre (Custodio y Llamas, 1976; Hem, 1986).

Las reacciones de oxidación-reducción tienden a modificar la concentración de las aguas naturales, bien sea por disolución o precipitación de los iones que presentan variedad de valencias (incluyen transferencia de electrones), destacando la solubilización del hierro y del manganeso. Estas reacciones son productoras de hidrogeniones por lo que es importante el equilibrio que regula el pH en muchas aguas naturales $CO_2 \leftrightarrow CO_3H^- \leftrightarrow CO_3^{=}$, sujeto a cambios de temperatura o presión de CO_2 ; la oxidación cede hidrogeniones y aumenta la agresividad del agua, esto permite nuevas disoluciones de caliza; mientras que las reducciones consumen hidrogeniones, esto permite la precipitación de calcita, dependiendo del balance de ambas reacciones. Por otra parte, la concentración por evaporación a consecuencia de regadíos puede llegar a producir precipitaciones a medida que las sales van alcanzando sus productos de solubilidad correspondientes, generalmente precipita de manera primaria el carbonato de calcio y luego con más dificultad el sulfato cálcico, en ocasiones se producen precipitaciones por mezcla de aguas, aunque este proceso es lento y con características específicas. Fenómenos de precipitación y disolución son de gran importancia para las aguas naturales y en el tratamiento de aguas para el consumo humano, donde ocurren procesos como el ablandamiento de agua con cal-carbonato, eliminación de hierro, la precipitación de fosfatos y la coagulación de sales metálicas hidrolizantes, los cuales se rigen por dichos fenómenos (Custodio y Llamas, 1976; Jenkins y Snoeyink, 2002).



La interacción de las diversas geósferas que conforman la tierra influye de manera directa en la eficiencia de los procesos químicos que gobiernan la composición química de las aguas naturales, procesos de meteorización, erosión, sedimentación, el tamaño y pureza cristalina de los minerales, la textura y porosidad de la roca, la estructura regional, el grado de fractura, el tiempo de exposición y otros factores geológicos, proporcionan la materia prima que en consecuencia de su disolución, ofrecen la composición química de las aguas en contacto. Este proceso que está fuertemente influenciado por factores climáticos como la cantidad, distribución y frecuencia de las precipitaciones, la temperatura del sistema que en su aumento, acelera tanto la solubilidad como la velocidad de disolución de la mayoría de los minerales de roca, la escorrentía y la evaporación, además del control bioquímico que existe en el sistema de aguas naturales y que es relevante y necesario abordar para en el tratamiento de aguas de consumo humano (Hem, 1986).

3.1.9 Aguas de consumo humano

Los principales componentes de un sistema de abastecimiento de agua potable en su forma más generalizada son: fuente de abastecimiento, planta de tratamiento y red de distribución (ver figura 6), cuyo propósito es abastecer a la población con agua de calidad apta para su consumo y así satisfacer sus necesidades con condiciones sanitarias que garanticen una mejor calidad de vida, es importante señalar, que la satisfacción de la demanda depende de la disponibilidad del agua de su fuente y la calidad que la planta de tratamiento pueda alcanzar, de esta manera la fuente de abastecimiento representa el eje principal de sustentabilidad del sistema; asimismo, la factibilidad técnica, económica y de operación de la planta de tratamiento en gran medida, dependen de su variabilidad, bien sea por razones naturales o antrópicas; por lo que es necesario estudiar y mantener un monitoreo frecuente en las fuentes de abastecimiento y sus áreas de influencia que

permitan tomar decisiones a tiempo. Las fuentes de abastecimiento pueden ser superficiales donde destacan los ríos, lagos, quebradas y embalses que incluyen lagos artificiales; y subterráneas, presentes en acuíferos confinados y no confinados (Najul y Blanco, 2003).

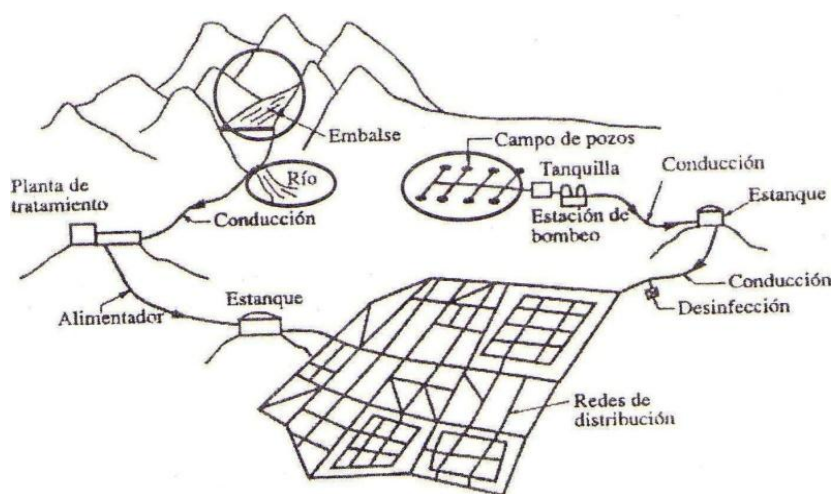


Figura 6: Esquema de un sistema de abastecimiento de agua potable (Najul y Blanco, 2003).

3.2 Antecedentes

Estudios que evalúan la relación entre las enfermedades cardiovasculares y la dureza del agua tienen interés desde la década del 50, donde se inician estudios sobre la variabilidad de la distribución por región de la morbilidad y mortalidad por estas enfermedades. Diversos estudios han encontrado una disminución de la mortalidad por enfermedades cardiovasculares e incluso mayor control de la presión arterial, en zonas donde el tipo de agua consumida por la población es agua dura cuyo intervalo de concentración está entre 150-300 mg/L CaCO_3 .

Kobayashi (1957) se dedicó al estudio de la naturaleza del agua de riego desde el punto de vista agrícola desde 1942 y dejó en claro la naturaleza química de más de 600 ríos importantes de



Japón. En este estudio encontró que existe una estrecha relación entre la composición química del agua de río y la tasa de muerte de apoplejía (enfermedad cardiovascular), sugirió además que la proporción de sulfato/carbonato estaba relacionada a la tasa de mortalidad por apoplejía; adicionalmente manifestó que el CaCO_3 podría inducir o prevenir la apoplejía de acuerdo a su concentración. Este autor estableció que la mayor tasa de mortalidad por enfermedades cerebrovasculares en Japón estaba localizada en regiones donde las aguas de los ríos eran más blandas y con un pH más ácido que los ríos de aguas duras, debido a la composición química natural del terreno.

Rubenowitz *et al.* (1996) tuvo como objetivo de estudio encontrar relación entre la cantidad de magnesio en aguas potables de 17 municipalidades al sur de Suecia, cuyos parámetros de tratamiento, dureza y pH no habían sido alterados desde la última década, y la muerte por infarto al miocardio agudo, aplicado a la población masculina en edades comprendidas entre 50-69 años. Para ello, utilizó registros de mortalidad por infarto al miocardio agudo y registros control, cuya mortalidad fue causada por cáncer, generalmente los casos control son muertes ocurridas por cualquier otro tipo de enfermedad diferente a la estudiada, durante el mismo período (1982-1989).

Los resultados obtenidos en el citado estudio sugieren que el magnesio en agua potable funge como un factor protector importante contra el infarto al miocardio agudo en la población masculina, específicamente fue indicado que la relación de probabilidad de muerte por infarto al miocardio agudo, es significativamente menor en un 19% para los grupos que consumían agua potable con niveles altos de magnesio ($\geq 9,8$ mg/L). Para la validación de estos datos fueron



tomadas muestras de agua de chorro en la oficina central de cada municipio, analizadas con el espectrofotómetro de absorción atómica, encontrándose una fuerte correlación entre los valores de calcio y magnesio de los análisis realizados y la información obtenida del sistema de abastecimiento de agua potable, demostrándose que la concentración de magnesio en el agua no varía en el camino de la instalación de abastecimiento de agua potable a las casas de los sujetos en estudio.

Por su parte, **Yang (1998)** también realizó diversos estudios con casos control, específicamente examinando la relación entre los niveles de calcio y de magnesio en agua potable y la muerte por enfermedad cerebrovascular en Taiwán, utilizando índices de mortalidad por enfermedad cerebrovascular de personas que habían sido residentes en Taiwan durante el periodo 1989-1993 cuyos datos de calcio y magnesio los obtuvo de la industria de agua potable de Taiwán. Este autor discriminó ciertos municipios porque estos eran suplidos por más de una instalación de abastecimiento de agua potable y no existía información exacta sobre a cual población surtía, así como también aquellos municipios constituidos por aborígenes e incluyendo otros 9 isletas que presentaban diferentes ambientes y estilos de vida, esto originó que en definitiva fueron evaluados 252 municipios. Este estudio arrojó como resultado que existe un efecto protector significativo del magnesio en agua potable ante el riesgo de muerte por enfermedades cerebrovasculares, si los niveles de Mg consumidos vía en agua potable están entre 13,5 y 41,3 mg/L.

Yang et al. (1999) en otro estudio de casos control en Taiwán, se plantearon como objetivo estudiar la relación entre los niveles de dureza total en el agua potable de los suministros



municipales y la muerte por cáncer rectal, manejando para ello, datos de mortalidad en el periodo de 1990 y 1994, sobre personas entre 50 y 69 años de edad, como premisa estos debían tener el mismo lugar de residencia y de muerte en la misma municipalidad. Estos datos fueron suministrados por la industria de agua potable de Taiwán, incluyó la media anual de los niveles de dureza de todas las 252 municipalidades seleccionadas, usados como indicador, divididos en una de las tres categorías de dureza mutuamente excluyentes: <75 mg/L de CaCO_3 (aguas blandas), 75-150 mg/L de CaCO_3 (aguas moderadamente duras) y sobre 150 mg/L CaCO_3 (aguas duras). Como resultado de este estudio los autores recalcaron que existe una distribución geográfica importante de dicha enfermedad y que esto puede sugerir la presencia de un factor de riesgo ambiental, encontraron además una relación negativa significativa entre la dureza del agua potable y la mortalidad de cáncer rectal; es decir, la tendencia de los análisis mostró un incremento en las variaciones de la proporción de cáncer rectal con niveles decrecientes de dureza en agua potable, específicamente un incremento de 38% en la mortalidad por cáncer rectal en zonas de consumo de aguas blandas; por ello estos autores sugieren que el consumo de agua dura es un posible efecto protector ante la muerte de cáncer rectal en Taiwan.

Kousa *et al.* (2004), plantearon examinar la posible asociación de variaciones espaciales en la incidencia de infarto al miocardio agudo con los componentes geoquímicos en aguas subterráneas de Finlandia. Para ello, manejaron datos hidrogeoquímicos que fueron obtenidos de la base de datos de estudios geológicos de ese país, extraídos de 3.621 hasta 12.407 muestras de aguas subterráneas y datos de 18.496 hombres de 35 a 74 años de edad con el primer ataque de infarto al miocardio agudo en los años 1983, 1988 y 1993, obtenidos del registro de estadística nacional de muertes y salida del hospital de Finlandia. La incidencia ajustada a todas las edades de infarto



al miocardio agudo entre hombres de 35 a 74 años fue de 480/100.000/año. El incremento en la dureza del agua en una unidad, disminuyó el riesgo de infarto al miocardio agudo en 1%; por otra parte, los niveles de otros elementos geoquímicos incluidos en este estudio no tuvieron ningún efecto adicional en la variación espacial de la incidencia de infarto al miocardio agudo.

Kousa *et al.* (2004) en este estudio confirman los resultados obtenidos a partir de observaciones anteriores en lo que respecta a la relación inversa entre la dureza del agua y enfermedades coronarias. Estos autores consideran que la incidencia de infarto al miocardio agudo no puede ser explicada solo por el estilo de vida y factores genéticos, sino que además debe ser tomada en cuenta la exposición ambiental como factor que contribuye al desarrollo de la enfermedad, en específico la variación y cambios geográficos de la zona estudiada y la presencia de elementos traza en suelos y aguas subterráneas. De este modo, el rol de la Geoquímica Ambiental en la variación geográfica de la incidencia del infarto al miocardio agudo debe ser estudiado en detalle, además de incorporar la absorción individual de nutrientes en la ingesta de agua y comida; indican además que el análisis Geoquímico-espacial proporciona una base para la selección de áreas convenientes para tal investigación.

Kousa *et al.* (2006), examinó la relación entre el riesgo de infarto al miocardio agudo y el contenido de calcio, magnesio y cromo en aguas subterráneas locales y áreas rurales finlandesas, en cuyo estudio participaron 14.495 hombres de edades entre 35 y 74 años que vivían en zonas rurales de Finlandia. Los datos de las personas infartadas lo obtuvieron del registro nacional de fallecidos y el registro del hospital; es decir, fueron utilizados datos tanto de morbilidad como de



mortalidad en los años 1983, 1988 y 1993, asimismo datos geoquímicos de 4.300 medidas de cada elemento en aguas subterráneas locales también fueron involucrados en este estudio.

Las concentraciones medidas de Mg, Ca, Cr y la relación Ca:Mg fueron 2,61 mg/L, 12,33 mg/L, 0,27 mg/L y 5,39 mg/L, respectivamente, obteniendo como resultado que la relación del nivel de Mg y la proporción Ca:Mg al riesgo de infarto al miocardio agudo fueron similares en todos los grupos de edades. Un incremento de 1 mg/L en la concentración de Mg en las aguas subterráneas de Finlandia, conllevó a la disminución en el riesgo de infarto al miocardio agudo en 4,9% y consideró que un incremento en una unidad en la proporción de Ca:Mg aumentó el riesgo de dicha enfermedad en un 3,1%; por otra parte, la concentración de Ca y Cr no mostró ningún efecto estadísticamente significativo en la variación espacial de la incidencia de infarto al miocardio agudo. Los resultados de este estudio soportan la información previa del rol cardioprotector del Mg y el beneficio de la baja proporción Ca:Mg contra enfermedades coronarias.

Específicamente las conclusiones de una correlación positiva entre la mortalidad por enfermedades cardiovasculares y la relación estimada Ca:Mg en la dieta de países diferentes, sugiere que una alta relación Ca:Mg en la dieta diaria puede ser perjudicial, esto mostró de manera implícita que el contenido de Mg en la dieta diaria bien sea vía agua potable o alimento es bajo cuando la relación Ca:Mg es alta, por otra parte este estudio no sostiene la hipótesis previa de un rol protector del calcio.



Havulinna *et al.* (2008); Kousa *et al.* (2008) y Kousa *et al.* (2012), actualizan los resultados obtenidos en estudios antes realizados, con datos más recientes acerca del patrón espacial del infarto al miocardio agudo (AMI), en la población tanto masculina como femenina, así como la diabetes tipo 2 en adultos jóvenes menores de 40 años y la distribución de magnesio y de otros elementos en agua potable en Finlandia. Los resultados obtenidos mostraron que el patrón espacial de la variación del AMI no ha cambiado durante décadas, asimismo la alta incidencia del AMI en Finlandia del este se asocia al agua subterránea suave, específicamente baja en concentración de magnesio. El área del agua subterránea más dura está en el sur y a lo largo de la costa mientras que el área con el agua más suave está en el NE, destacando que la composición mineral del suelo y de la roca de fondo tiene un impacto claro en la calidad del agua subterránea, que en general ha sido absolutamente similar año tras año.

Diversos factores de riesgo clásicos son causales de dichas enfermedades, en Finlandia estos factores han disminuido, la situación socioeconómica ha mejorado y la forma de vida ha llegado a ser uniformemente más sana en la población finlandesa; por lo tanto, la estabilidad en la variación geográfica en la incidencia del AMI apoya la hipótesis que diversos factores en el ambiente físico pudieron desempeñar un papel en desarrollar el AMI en la población susceptible; sin embargo, algunos estudios no han podido encontrar relaciones entre la dureza del agua o la deficiencia del magnesio y el riesgo de enfermedades cardiovasculares, así como ninguna asociación clara con la incidencia de diabetes tipo 2 en adultos jóvenes, pero podría señalarse que está en aumento la evidencia que los productos bajos del magnesio están asociados a varias enfermedades metabólicas, incluyendo enfermedades cardiovasculares, la hipertensión, la arritmia cardíaca y diabetes tipo 2 entre otros.



4. ZONA DE ESTUDIO

Para cumplir con los objetivos propuestos, fue planteado en Junio del 2008 un muestreo de aguas para el consumo humano ante el Comité Técnico Nacional de Calidad de Agua en Venezuela, el cual es conformado por todas las empresas hidrológicas del país, Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, Ministerio del Poder Popular para la Salud y un representante de la Facultad de Ingeniería Sanitaria de la U.C.V., donde 9 empresas hidrológicas conformadas por Hidrocapital, Hidrocentro, Hidrofalcón, Hidrolara, Hidrolago, Hidrollanos, Aguas de Ejido, Aguas de Mérida y Aguas de Yaracuy que operan en los estados Apure, Carabobo, Falcón, Lara, Mérida, Miranda, Vargas, Yaracuy y Zulia además del Distrito Capital, asumieron el muestreo planteado.

De las 9 empresas hidrológicas que asumieron el muestreo resultó un total de 57 plantas potabilizadoras, de las cuales para este proyecto fueron tomadas 47 de ellas (ver apéndice B), para cumplir con los requerimientos del muestreo planteado, dichas plantas de tratamiento corresponden en su mayoría a plantas de tipo convencional con tratamiento completo o plantas de tipo no convencional con tratamiento parcial, que abastecen de agua potable a la mayor cantidad de población por región.

De acuerdo al Ministerio del Ambiente y los recursos Naturales Renovables (1997) existen 119 plantas de tratamiento distribuidas por empresas hidrológicas regionales, de las cuales se trabajó con 47 de ellas, como se indicó anteriormente, representadas en la figura 7 a través de las fuentes de abastecimiento que las surten (embalses, ríos, quebradas, pozos profundos y manantiales) y la figura 8 por planta de tratamiento. Los datos de las 47 plantas de tratamiento son presentados en el apéndice A, como: nombre específico de la planta potabilizadora, fuente de abastecimiento,

ubicación y población o comunidad abastecida de agua potable por región, cuyos registros permiten hacer una distribución por región cercana a la realidad en cuanto a la cantidad de calcio, magnesio, sodio y potasio que se consume, de acuerdo a las muestras enviadas por cada planta de tratamiento, con la finalidad de aportar información que pueda ser usada en la elaboración de una base de datos – georeferenciada – como aporte a estudios posteriores.

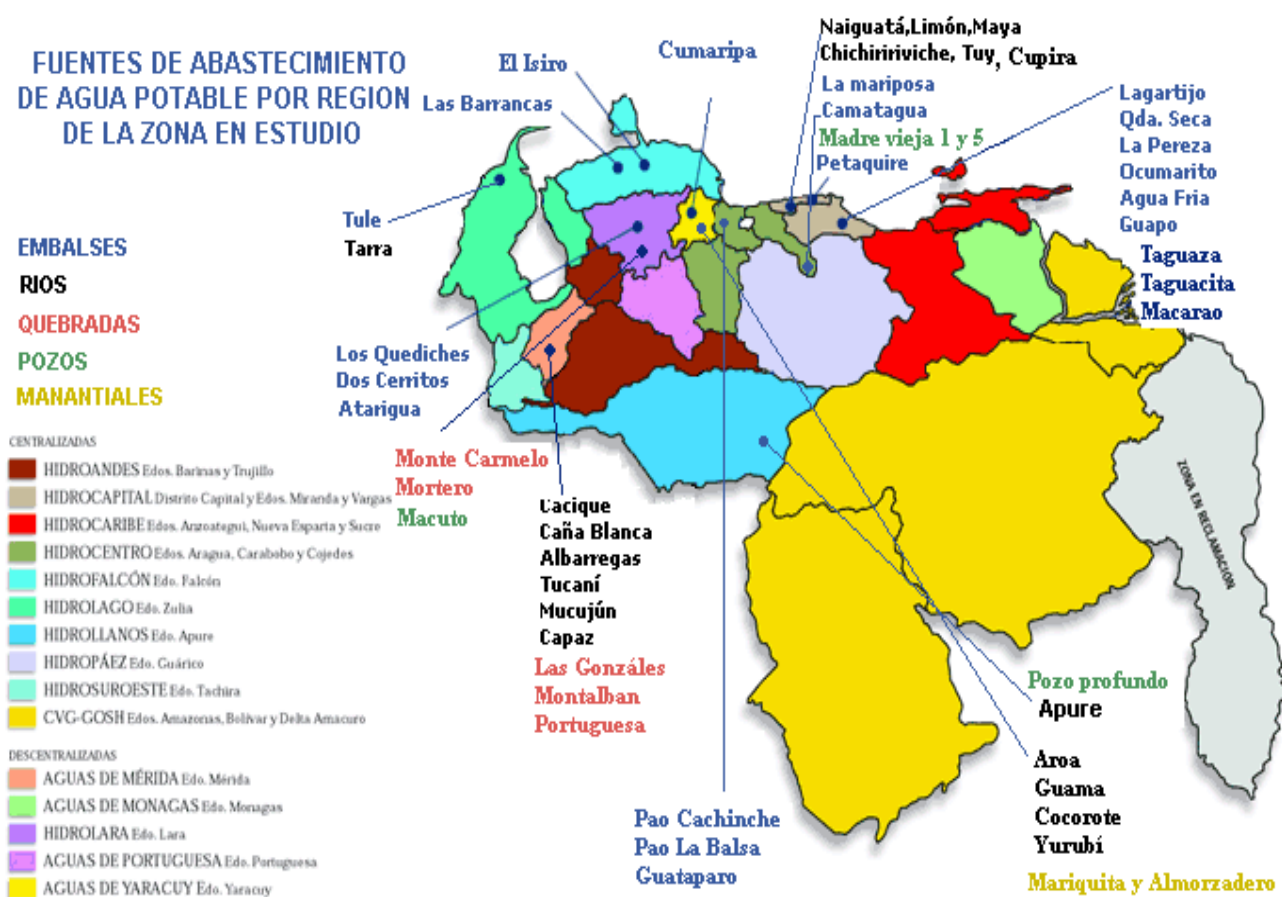
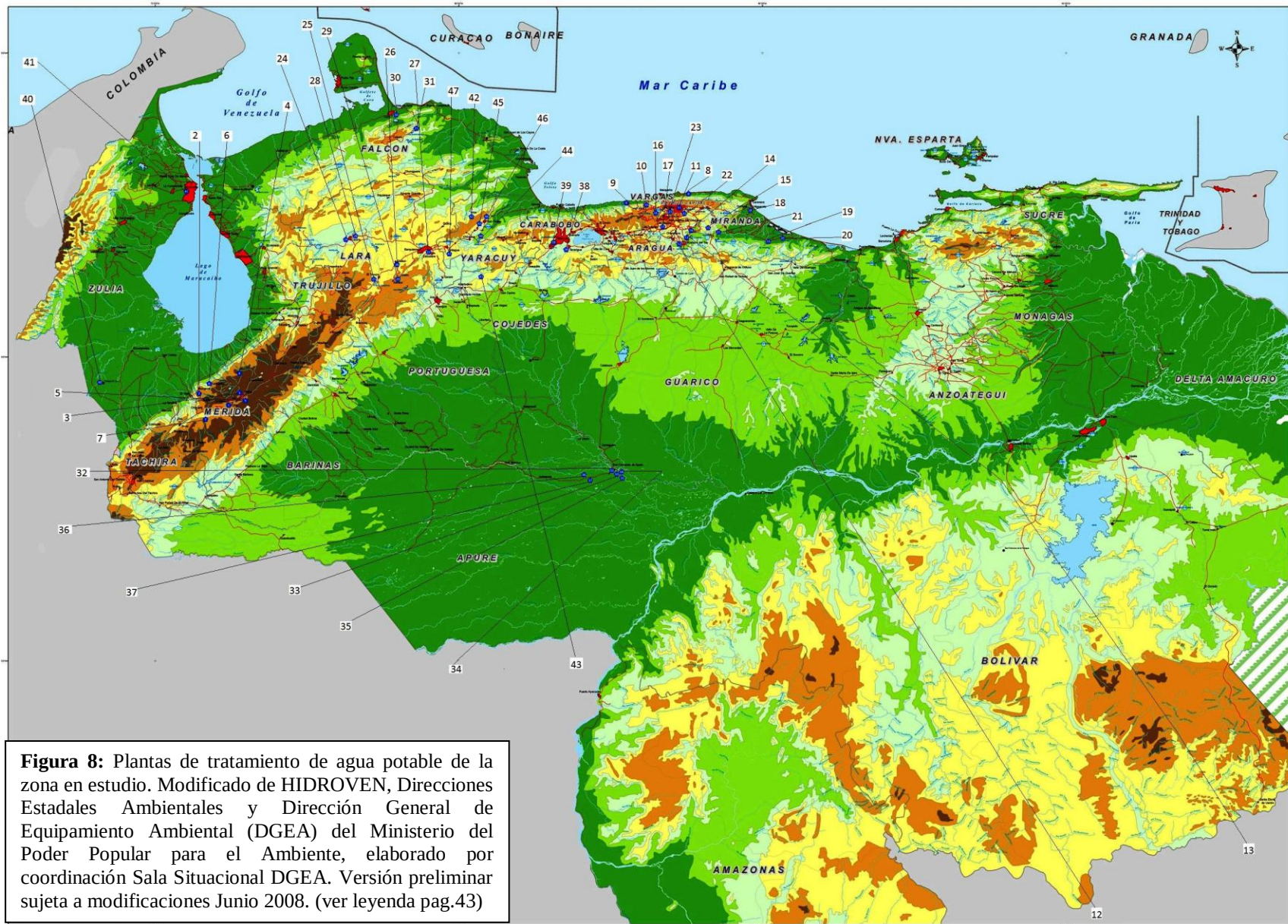


Figura 7: Fuentes de abastecimiento de agua potable por región de la zona en estudio, zonificados por empresas hidrológicas en Venezuela. Modificado de mapas y embalses <http://www.hidroven.gov.ve>.





# Planta	Nombre de planta potabilizadora	# Planta	Nombre de planta potabilizadora
1	Eleazar López Contreras	24	Carora
2	Mucujepe	25	Tocuyo
3	Dr. Eduardo Jáuregui	26	Ciudad de Barquisimeto
4	Luis Mora	27	El Manzano
5	Dr. Luis Enrique Bourgoin	28	Sabaneta
6	Bernardo Luzardo	29	Sanare
7	Homero Izarra Avendaño	30	El Isiro
8	Naiguatá	31	Luis Martin Martinez Barrancas
9	Picure	32	San Fernando Centro
10	Carayaca	33	El Recreo
11	La Perezza	34	Pedro Camejo
12	Ocumarito	35	La Guamita
13	TM-1	36	Llano Alto
14	Caujarito	37	Santa Rufina
15	La Peñita	38	Lucio Baldo Soules
16	Macarao	39	Dr. Alejo Zuloaga
17	Los Teques	40	Casigua
18	Sotillo	41	Alonso de Ojeda
19	El Guapo	42	Aroa
20	Las Mercedes	43	Caicara
21	Taguaza	44	Cumaripa
22	Ciudad de Caracas, La Guairita	45	Cocorote
23	La Mariposa	46	San Felipe
		47	Yaritagua





5. METODOLOGIA

El presente capítulo describe las etapas que se llevaron a cabo durante el desarrollo del proyecto, las mismas serán descritas de la siguiente manera: una etapa de *laboratorio*, que comprende en detalle la descripción general de la cantidad de muestras que se recibieron, así como tratamiento y análisis químicos efectuados una vez recibidas las muestras y la etapa de *tratamiento estadístico de datos*, donde se describen las herramientas necesarias para la validación e interpretación de los datos obtenidos. En la figura 11 se muestra el resumen de la metodología seguida en este estudio.

5.1 Etapa de laboratorio

5.1.1 Recepción de muestras

De las 47 plantas potabilizadoras que operan en los estados: Apure, Carabobo, Falcón, Lara, Mérida, Miranda, Vargas, Yaracuy y Zulia, además del Distrito Capital, durante un periodo de tiempo de agosto a noviembre del 2008, se recibieron dos muestras por planta potabilizadora. De manera general, una corresponde a 1L de agua cruda y la otra a 1L de agua tratada, tomadas en la entrada de la planta y en la salida respectivamente (ver figura 9), de esta manera se obtuvo un total de 94 muestras de agua, específicamente 47 muestras de agua cruda y 47 muestras de agua tratada, siendo preservadas en un lugar fresco y oscuro desde el momento de su recepción (Custodio, 1976; Rodier, 1981).

Cada muestra se recibió perfectamente identificada y adjunto la ficha de identificación correspondiente, en la cual se indican valores físicoquímicos como pH, conductividad y alcalinidad, así como también: fecha de recolección de muestra, coordenadas geográficas (latitud

y longitud), fecha en que comenzó a funcionar la planta de tratamiento y número de habitantes que se sirven del agua, además de los ya mencionados en el apéndice A, dicha información fue suministrada por cada planta de acuerdo a la posibilidad de recursos de la misma.



Figura 9: Muestras de agua enviadas por las empresas hidrológicas: Hidrocapital, Hidrocentro, Hidrofalcón, Hidrolara, Hidrolago, Hidrollanos, Aguas de Yaracuy, Aguas de Mérida y Aguas de Ejido.



5.1.2 Tratamiento de muestras

Las muestras se trataron en el laboratorio de prospección del Instituto de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela.

La totalidad de las muestras (94) fueron filtradas a través de la técnica de filtración por membrana con un equipo de filtración de marca Millipore, cuya capacidad es de 250 mL, acoplado a una bomba de succión eléctrica para generar vacío (ver Figura 10), lo que permitió facilitar el trabajo. Se empleó una membrana millipore de 0,45 micrómetros; dicho equipo de filtración fue previamente lavado con una solución de HNO_3 al 10% y enjuagado con agua desionizada al menos 3 veces con alícuotas de 20 mL c/u; por otra parte el curado del sistema de filtración se hizo con el agua de la muestra a filtrar con alícuotas de 20 mL 2 veces antes de agregar el volumen final a filtrar y entre cambio de muestra se lavó el sistema de filtrado con agua desionizada 3 veces con alícuotas de 20 mL c/u.

Las muestras fueron almacenadas en envases de polietileno de capacidades de 1 L, 500 mL, 250 mL y 50 mL de acuerdo a su requerimiento de análisis, previamente curados y lavados de acuerdo a la normativa APHA (American Public Health Association) para la determinación de cationes (Franson, 1992), específicamente tratados con una solución de HNO_3 al 10%, dejándolos en contacto con dicha solución por un periodo de 24 horas de permanencia y se usó en 3 oportunidades alícuotas de 20 mL c/u con agua desionizada para su enjuague, curados con el agua ya filtrada a envasar, al menos con una alícuota de 20 mL antes de agregar el volumen final al envase, el cual se llenó completamente sin dejar aire (Rodier, 1981).

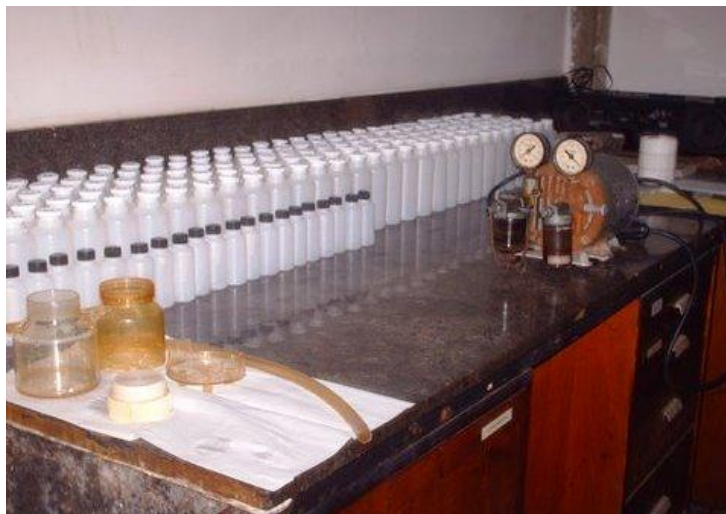


Figura 10: Equipo de filtración, bomba de succión y envases de polietileno utilizados en la etapa de laboratorio.

En cuanto a la identificación de las muestras procedentes de las plantas potabilizadoras se tomó en cuenta el estado de procedencia, seguido la empresa hidrológica a la cual pertenece, luego, el número correspondiente de planta potabilizadora, puesto que cada planta tiene un único número, asignado sin preferencia, pero sí de acuerdo al orden de llegada de las muestras, de manera sucesiva se asignó la letra “a” o “b” de acuerdo al tipo de agua: agua cruda (a) y agua tratada (b); además de la fecha de filtración de la muestra.

La totalidad de las muestras de las plantas potabilizadoras (94) se filtraron con una alícuota de 250 mL, mediante el procedimiento de filtración previamente descrito, de la misma manera se acidificó cada una de las muestras filtradas con 1mL de HNO_3 12M bidestilado (procedimiento que se realizó de manera primaria en la preparación de los materiales y reactivos a utilizar en la experimentación) y así garantizar una acidez menor a 2 unidades de pH para la determinación de cationes calcio, magnesio, sodio y potasio por la técnica instrumental de espectroscopia de emisión óptica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP-OES), además de tratar de



disminuir la variación de sus condiciones medioambientales iniciales y que el aumento de pH por la pérdida progresiva de dióxido de carbono disuelto, ocasione que dichas especies catiónicas pudiesen retirarse de la solución como hidróxidos coloidales. El mantenimiento de las condiciones acidas conduce a que los hidróxidos de especies catiónicas se disuelvan (Hernández, 2005).

De acuerdo a los valores de dureza total de referencia, de algunas plantas de tratamiento, emitidos por Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables(1997) e HidroLara, institución que reportó datos de dureza total y cálcica, se estimó la dureza magnésica y las concentraciones de calcio y magnesio de cada muestra reportada (ver tabla 7 y tabla 8), así, se decidió diluir todas las muestras 10 veces (10 mL de muestra en 100 de solución) incluyendo el blanco de filtración y en aquellas muestras cuya dureza cálcica reportada era ≥ 90 mg/L se diluyeron 100 veces (1mL de muestra en 100 mL de solución) específicamente las muestras del estado Lara excepto la LaHLA25a y LaHLA25b que muestra un grado de dureza correspondiente a aguas blandas, por lo que no fue necesaria su dilución, dichas diluciones se realizaron con la finalidad de que las concentraciones de cationes estuviesen dentro del intervalo de concentraciones establecido para su análisis, siguiendo las normas de análisis para cationes (Franson, 1992).

Tabla 7: Dureza reportada y valor calculado (*) de dureza magnésica y de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} (HidroLara, 2008).

MUESTRA	Dureza mg/L			Concentración (mg/L) (*)	
	Cálcica	Magnésica (*)	Total	Ca^{+2}	Mg^{+2}
LaHLA25a	18	6	24	7,2	1,44
LaHLA26a	90	40	130	36	9,6
LaHLA27a	100	40	140	40	9,6
LaHLA28a	540	20	560	216	4,8
LaHLA29a	180	60	240	72	14,4
LaHLA30a	130	10	140	52	2,4



Tabla 8: Dureza total (mg/L) CaCO_3 y pH de algunas plantas potabilizadoras a nivel nacional (M.A.R.N.R, 1997).

#	NOMBRE DE LA PLANTA	Dureza Total CaCO_3 mg/L		pH	
		Agua Cruda	Agua Tratada	Agua Cruda	Agua Tratada
1	Ciudad de Caracas	166	144	7,4	7,2
2	La Mariposa	-----	-----	8,1	7,2
4	Macarao	-----	-----	6,8	6,6
5	Caujarito	-----	3	7,6	7,4
11	Picure	90	71	7,8	7,2
12	Naiguatá	30	30	7,1	6,7
15	Alejo Zuloaga	92	95	7,25	7,37
16	Los Teranes	38	46	7,6	7,2
18	Lucio Baldo Soubles	104	88	7,47	7,32
19	San Carlos	158	144	8,2	7,8
25	Camatagua	102	102	8	7,9
27	Pie del Cerro	110	100	8	7,8
28	Colonia Tovar	132	130	8	7,6
29	Jose A. Anzoategui	130	132	8	7,6
41	Juan Jose Codallos	62	80	8,7	8,7
42	Turimiquire	120	116	7,5	7,5
47	Ciudad de Barquisimeto	117	106	7	6,8
49	Carora	13	13	7,06	6,38
52	Camburito	150	145	7,2	7
54	San Felipe	124	116	7,5	6,9
56	Cocorote(Edo.Yaracuy)	1,45	0,6	8,1	7,6
58	Cordero	66	76	8	6
59	Bermeja	50	50	6	6
64	Alonso de Ojeda	86	86	7,4	6,8
65	Planta B	56	53	6,7	6,9
66	El Tablazo	86	86	7,2	7,2
71	Machiques	41	66	6,4	6,7
72	Casigua, El Cubo	22	46	5	6,7
73	El Brillante	116	116	7,6	7,1
74	El Isiro (Edo. Falcon)	219	225	7,9	7,6
75	Luis Martin Martinez	141	147	8,1	7,8
79	Mirimire El Cristo	185	193	8	7,7
80	Ciudad de Barinas	46	55	8,83	7,86
81	Enrique Bourgoin	24	22,4	7,3	7,6
82	Eduardo Jauregui	15	14	7,6	7,3
83	Mucujepe	71	64	7,9	7
84	Ciudad de Valera	154	100	7,2	6,8
86	Boconó	86	81	7,4	7,2
88	San Juan de los Morros	113	182	8,1	7,9
90	Chapaiguana	92	94	7,2	6,5
93	Valle de la Pascua	-----	-----	7,6	7,2
97	Puerto Ordaz(toro muerto)	3,08	15,2	6,51	7,45
95	San Felix	3,08	22	6,48	7,96
103	Tumeremo	12	12	7,35	6,95
106	Puente Blanco(El Callao)	32	34	7,37	6,67
109	Tucupita	10	21	7,13	7,01
111	Maturin	72	71	8,1	7,6
112	Amana	36	36	8	7,5
117	San Fernando de Apure	58	46	7,4	7,2
118	Achaguas	60	50	6	7,8

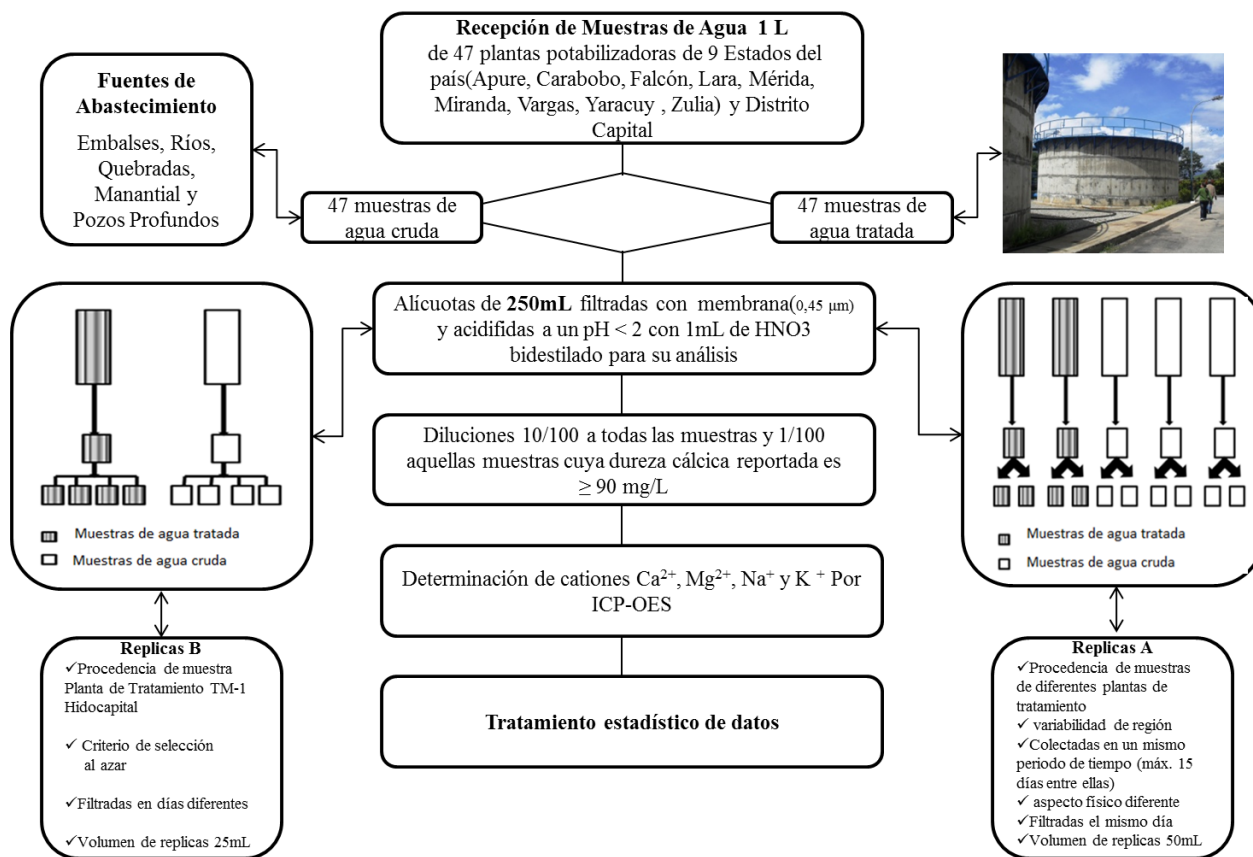


Figura 11: Esquema generalizado de la metodología empleada

El blanco de filtración, fue manipulado como en el tratamiento general de la muestra, de manera específica, fue tomada una muestra de agua desionizada en un envase de polietileno de volumen de 1L, previamente limpio como se indicó anteriormente, luego se filtró una alícuota de 250mL con membrana millipore de 0,45 micrómetros y fue acidificado con 1mL de HNO₃ 12M bidestilado, seguidamente se diluyó 10 veces de manera similar al tratamiento de las muestras y finalmente se identificó para su análisis.

5.1.3 Réplicas A y B

Con el criterio de variabilidad de región, aspecto físico diferente, se escogieron 5 muestras (2 muestras de agua tratada y 3 muestras de agua cruda) colectadas en un mismo periodo de tiempo (con una diferencia máxima de 15 días entre ellas), correspondiendo así a los estados Falcón, Carabobo, Apure y Yaracuy; de cada muestra se tomó una alícuota de 250 mL, filtrada con membrana millipore de 0,45 μm y acidificada con 1 mL de HNO_3 12 M bidestilado, todas el mismo día, para evaluar su repetibilidad, luego de cada alícuota de 250mL se tomaron dos réplicas de 50mL cada una, posteriormente se diluyó 10 veces para aplicar el mismo procedimiento del resto de las muestras y finalmente su análisis, lo que corresponde a las réplicas A (ver figura 12).

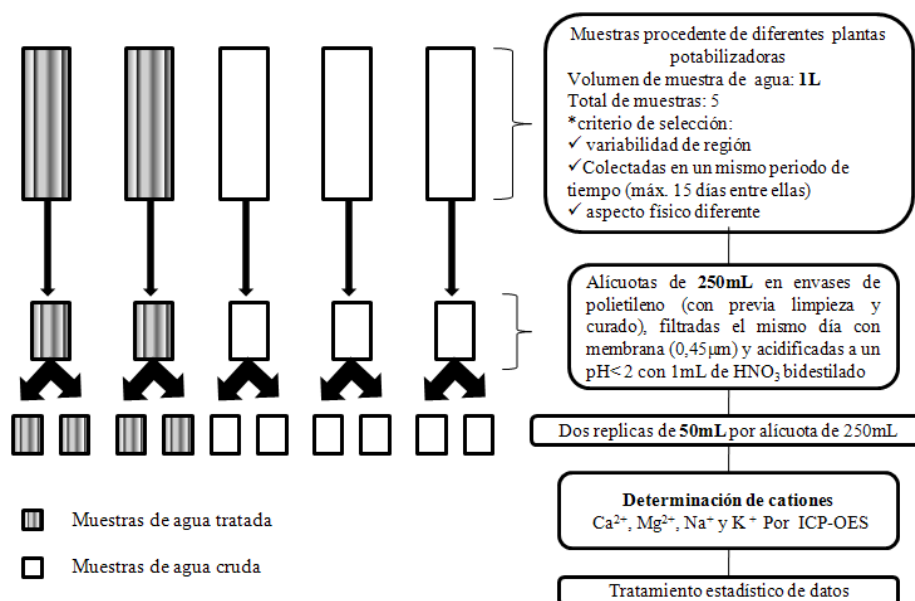


Figura 12: Esquema replicas A de la metodología empleada

Por otra parte se seleccionó al azar la planta de tratamiento TMI-1 correspondiente a HIDROCAPITAL, escogiendo ambos tipos de muestras de agua: la cruda y la tratada, de cada muestra se tomó una alícuota de 250mL filtrada con membrana millipore de 0,45 μm y

acidificada con 1 mL de HNO_3 12M bidestilado, a su vez, de esta alícuota fueron tomadas 4 réplicas de 25mL filtradas en días diferentes, para evaluar su reproducibilidad, luego se diluyó 10 veces para aplicar el mismo procedimiento del resto de las muestras y finalmente su análisis, correspondiendo así a las *réplicas B* (ver figura 13)

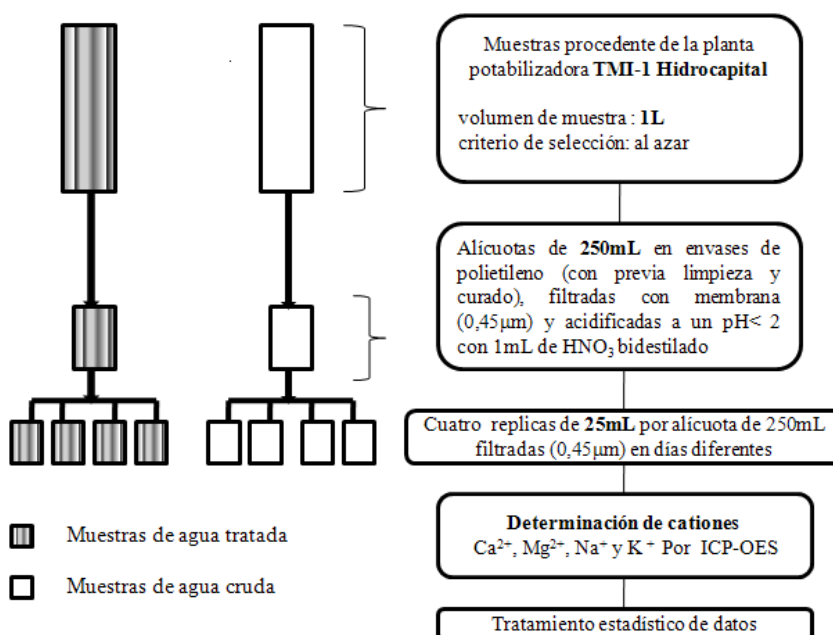


Figura 13: Esquema replicas B de la metodología empleada

5.1.4 Determinación de la concentración de cationes

Para la determinación de la concentración de cationes mayoritarios Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ en las muestras de aguas para el consumo humano, fue necesario el uso de la técnica instrumental espectroscopia de emisión óptica (OES) con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP), las condiciones experimentales se observan en la tabla 21 del apéndice E.

De acuerdo a los valores de dureza total y cálcica de referencia, sobre las muestras de agua de algunas de las plantas de tratamiento, emitidos por Ministerio del Ambiente y los Recursos



Naturales Renovables. (1997) e HidroLara y siguiendo las sugerencias de las normas de análisis para cationes (Franson, 1992), Fue estimado el intervalo de concentraciones de los analitos en las soluciones patrón de 0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 5; 10; 15; 20 mg/L, mostrados en la tabla 22 del apéndice E, preparados a partir de una solución multielemental de concentración 100 mg/L Ca, 5 mg/L Mg, 5 mg/L Na y 10 mg/L K, de un volumen total de 200 mL, a su vez elaborada con soluciones estándar de cada elemento de 1000 mg/L obtenidas del laboratorio de ICP del Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela.

Para garantizar la calidad de los resultados obtenidos, se realizó la calibración de los instrumentos a través del método de curvas de calibrado, donde fue introducido en el instrumento varias soluciones patrón de concentración conocida de los analitos de interés y se registró la señal instrumental, obteniendo así, la ecuación de la curva de calibrado por el método de mínimos cuadrados que permite calcular directamente la concentración de las muestras (Skoog, 2001).

5.2 Tratamiento estadístico de datos:

Con la finalidad de comparar, clasificar y visualizar de una mejor manera los datos obtenidos, el tratamiento estadístico de datos consistió en aplicar métodos de estadística descriptiva, mediante parámetros de tendencia central, como la media y la mediana y de dispersión, como la desviación estándar absoluta y el coeficiente de variación; estos parámetros permiten comprobar la precisión de los análisis, a través de sus características de repetibilidad y reproducibilidad al determinar a través de réplicas A y B, descritas en la metodología, cada uno de los parámetros sobre una misma muestra, por otra parte se empleó el parámetro de dispersión de la mediana y la desviación absoluta de la mediana (MAD) que permite estimar el valor de fondo y su intervalo para cada una



de las especies químicas estudiadas por región y así extraer información sobre el orden de abundancia de dichas especies químicas, de manera general y por región (Montero, 1996), para así visualizar mejor y estimar la cantidad de calcio, magnesio, sodio y potasio, que se consume por región, vía agua potable y hacer una mejor interpretación de los resultados.

Por otra parte, el análisis de datos fue realizado con el empleo del método no paramétrico de las cajas graficas que permite observar los máximos y mínimos por elemento inmersos en la distribución de los datos, además de la realización de histogramas de frecuencia que permite conocer los datos en relación al grado de dureza que presentan las aguas de consumo humano en los 9 estados y Distrito Capital, también la clasificación de las aguas de acuerdo a su pH reportado por algunas de las plantas de tratamiento en las muestras enviadas, y en general se usó gráficos de dispersión y de barras que conllevan a una mejor visualización de los resultados obtenidos, todos los gráficos se generaron a través del programa Microsoft Office Excel 2007.

Es importante resaltar que el comportamiento de los datos en geoquímica es casi siempre inusual, siendo conformados por la concentración natural (valor de fondo) correspondiente al sustrato en el cual están inmersas las aguas, pero también estará enriquecido de elementos de origen antrópico, de esta manera, dichos datos no forman parte de una misma distribución, aun cuando se estudie una zona determinada, así el valor de fondo de un grupo de datos puede ser variable, de esta manera la primera opción para el tratamiento de datos geoquímicos es la aplicación de métodos no paramétricos.



Los métodos no paramétricos no asumen una distribución normal, donde el parámetro empleado más común es la mediana, como estimador robusto de datos, esto permite mejorar la calidad del análisis de señales sesgadas, lo que conduce a una mejora en los resultados y específicamente en el cálculo de fondo que se define como la mediana del conjunto de datos por elemento (Díez, 2006; Reimann, 2005), parámetro que fue aplicado en cada una de las especies químicas de los datos obtenidos para estimar el valor de fondo por región y de manera general, el cual es definido como: $\text{Mediana} \pm 1,5 \text{ MAD}$, siendo MAD la desviación absoluta de la mediana de todo el conjunto de datos por elemento $\text{MAD} = \text{mediana} (| X_i - X_{\text{mediana}} |)$, donde X_i es el valor de la concentración de cada muestra y X_{mediana} es la mediana del conjunto de datos (Miller, 2002), dicho estimador es análogo a la $\text{Media} \pm 2S$, siendo S la desviación estándar absoluta, utilizado como estimador en métodos paramétricos.

Para la mayoría de las pruebas estadísticas es necesario que las muestras provengan de la misma distribución, esta condición no es posible en muestras geoquímicas, las cuales están influenciadas por una multitud de diversos procesos que se reflejan en su valor analítico, como se mencionó anteriormente; sin embargo, algunos estudios geoquímicos emplean como parámetro la $\text{media} \pm 2$ desviación estándar absoluta del conjunto de resultados, como valor de fondo, asumiendo una distribución normal de los resultados, así como el empleo de contrastes estadísticos que enmarquen una significancia en los parámetros a comparar (Reimann, 2005), esta postura es soportada por el teorema de límite central que demuestra que la distribución en el muestreo de la media puede ser aproximadamente normal, incluso si la población de partida tiene una distribución muy diferente (Miller, 2002).



En este proyecto se aplicó el contraste estadístico de significancia t de dos colas, que permite comparar las medias de dos grupo de datos y determinar si entre estos parámetros las diferencias son estadísticamente significativas, así mismo se utilizó dicho estadístico para determinar si hay buena linealidad, es decir, si el coeficiente de correlación en las curvas de calibración es realmente significativo, además en el test de detección del sesgo (apéndice I) se aplicó también el parámetro estadístico t , comparando la diferencia experimental con la calculada.



6. PRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En esta etapa serán presentados los resultados experimentales obtenidos en el proyecto geoquímico II, donde fue estudiado un total de 94 muestras de aguas para el consumo humano, provenientes tanto de la entrada como salida de las plantas de tratamiento que surten de agua potable a la mayor cantidad de población por región en 9 estados de Venezuela, específicamente Apure, Carabobo, Falcón, Lara, Mérida, Miranda, Vargas, Yaracuy, Zulia, además de Distrito Capital, resultados que son mostrados a partir de concentraciones elementales de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , así como también cálculos realizados de dureza total, cálcica y magnésica a partir de las concentraciones elementales de Ca^{2+} y Mg^{2+} , como posibles elementos incidentes en la salud. También se mostraran algunos datos fisicoquímicos como pH, conductividad, alcalinidad, y datos geográficos que fueron proporcionados por las plantas potabilizadoras sobre algunas de sus muestras, que en su conjunto facilitaron el proceso de interpretación, el cual será plasmado en esta etapa, junto con la validación de la técnica empleada para el análisis de dichas muestras, de manera inicial.

Con la finalidad de hacer una interpretación clara de los resultados obtenidos, su discusión es presentada en 4 puntos principales, de la siguiente manera: primariamente se referirá la *validación del método* determinación de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ en aguas de consumo humano y análisis mediante la técnica de ICP OES; seguidamente, se hará una *descripción general* de las muestras de aguas de consumo humano provenientes de los 9 estados y Distrito Capital, donde se cita el grado de dureza que presentan, así como su dureza cálcica y magnésica, la clasificación de aguas de acuerdo al pH reportado por las plantas potabilizadoras, también se hizo una descripción general de las fuentes de abastecimiento (superficiales y subterráneas) de la cual se surten las



plantas potabilizadoras y como punto relevante el análisis de significancia entre muestras de aguas crudas y tratadas por elemento, luego se hace una *descripción por estado*, donde se citan los datos generados por las muestras (concentración de Ca, Mg, Na, K, orden de abundancia estimado por región, dureza total, cálcica y magnésica) , finalmente se plantea la *variabilidad de las concentraciones de Ca, Mg y dureza total* en aguas de consumo humano procedentes de las 47 plantas potabilizadoras, como posibles elementos incidentes en la salud.

6.1 Validación del método determinación de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+} en aguas de consumo humano y análisis mediante la técnica de ICP OES

Para demostrar que los resultados son aceptables se evaluaron algunos parámetros de validación como: linealidad, límites de detección LOD y cuantificación LOQ, precisión (repetibilidad y reproducibilidad) y veracidad (sesgo); en ese sentido, fue realizada la calibración directa con soluciones patrón para los elementos calcio, magnesio, sodio y potasio (ver figura 36 apéndice F), de las curvas obtenidas se observa una buena linealidad con coeficientes de correlación aceptables, para estimar si los valores experimentales se ajustan realmente a una línea recta; es decir, si los coeficientes de correlación son realmente significativos, se aplicó el contraste estadístico t de dos colas (ver ecuación f, apéndice F), siendo la hipótesis nula que su correlación=0, es decir, que no hay correlación entre X y Y, como se puede observar en la tabla 22 del apéndice F, el valor de t calculado con un nivel de confianza del 95% resultó mayor que el t crítico para (n-2) medidas en todos los elementos, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existe una correlación lineal significativa y que a medida que dicho valor es mayor,



su coeficiente de correlación se aproxima más a 1 y se manifiesta una buena linealidad (Miller, 2002).

En la tabla 23 del apéndice G están reportados los límites de detección LOD y cuantificación LOQ, calculados de acuerdo a las ecuaciones que se indican en dicho apéndice, de los cuales puede señalarse que ambos valores cumplen con el criterio de aceptación adecuado $LOD \ll LOQ$ para cada elemento (Instituto de Salud Pública-Departamento de Salud Ambiental, 2010).

La precisión se estableció en términos de sus características: repetibilidad y reproducibilidad, descritas a través de las réplicas A y B respectivamente, cuyos parámetros de calidad se reportan en las figuras 37 y 38 del apéndice H, de acuerdo a estos resultados puede decirse que hay una buena repetibilidad y reproducibilidad, que reflejan en la misma medida, buena precisión del método aplicado, demostrada en los % CV reportados, notándose de manera general un mismo orden de magnitud lo que también contribuye a decir que hay una precisión aceptable en la metodología aplicada; sin embargo, debe decirse que la precisión calculada en condiciones de repetibilidad da lugar a los mínimos valores de precisión y la precisión calculada en condiciones de reproducibilidad dan lugar a los máximos valores de precisión, ya que generalmente se obtienen valores distintos (CYTED, 2009).

En análisis de aguas, los resultados analíticos, específicamente la precisión no debe superar el 10%, sin embargo, para elementos cuyas concentraciones están por debajo de 1mg/L generalmente su precisión es pobre (Hem, 1986); esto es referente al caso específico del potasio que supera dicho porcentaje en dos de las muestras (FaHFA31a y AHLL37a).



En las réplicas B además de los parámetros de calidad se aplicó el parámetro estadístico t para determinar si hay diferencia significativa entre las concentraciones por elemento en muestra de agua cruda y agua tratada pertenecientes a la misma planta de tratamiento (TM-1), escogida al azar, es decir se compara la muestra antes y después del tratamiento que hace posible la potabilización del agua, el resultado se reportó en la parte c) de la figura 38 del apéndice H, como se observa en todos los elementos (Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio) el t crítico es mucho mayor que el t calculado por lo que se concluye que no existe una diferencia significativa entre el valor de la concentración por elemento en agua cruda o tratada para la muestra MiHCA13, de lo que se puede inferir que las concentraciones de dichos elementos en el agua para el consumo humano son independientes del tratamiento aplicado en la planta TM-1.

Para conocer la veracidad del método analítico se calculó el sesgo, para ello fue usada la solución patrón STD4 de concentración conocida, medida 9 veces (ver tabla 25, apéndice I), donde se comparó estadísticamente la diferencia experimental proporcionada por el sesgo, ecuación a) de la tabla 26 en el apéndice I, con la diferencia que se esperaría en un nivel de confianza del 95% si no existiera sesgo, a través del contraste estadístico t (ecuación b) tabla 26), donde se destaca que si el valor experimental es igual o menor que la diferencia calculada, entonces no queda demostrada la presencia de un sesgo, de esta manera se obtuvo como resultado para los elementos calcio, magnesio y sodio que a través de la comparación antes descrita, no queda demostrado la existencia de un sesgo, ya que la diferencia experimental resultó significativamente menor que la diferencia calculada para calcio y sodio y para magnesio resultó ser igual, no esperándose así para potasio ya que presentó una ligera pero diferencia experimental mayor que la diferencia calculada, de lo que puede decirse que es probable que exista un sesgo para este elemento, por



otra parte cuanto menor sea el sesgo, mayor es la veracidad del método, de esta manera se puede observar que para la medición de calcio, magnesio, sodio y potasio en aguas de consumo humano el sesgo obtenido para el método utilizado es admisible, y por lo tanto su veracidad es aceptable. (Skoog, 2001).

6.2 Descripción general de los resultados obtenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ y los calculados de dureza total, cálcica y magnésica en aguas de consumo humano provenientes de 9 estados de Venezuela y Distrito Capital, mediante la técnica de ICP OES y algunos datos fisicoquímicos facilitados por las plantas potabilizadoras

Los elementos presentes en un cuerpo de agua natural, así como su dureza, son el producto del continuo movimiento y su poder de disolución sobre rocas y suelos como parte del ciclo hidrológico, de esta manera el valor de la concentración del calcio, magnesio, sodio, potasio y por tanto su dureza total, varían de un lugar a otro, reflejando la naturaleza de la formación geológica con la cual han tenido contacto, por otra parte el impacto biológico, geomorfológicos, meteorológicos y antrópicos, entre otros, van modificando su composición en el transcurrir del curso del agua, por lo que la disponibilidad del elemento en sus aguas está sujeta a diversos factores que hay que considerar (Custodio, 1976; Hem, 1986).

Para conocer el grado de dureza que presentan las 94 muestras de agua para el consumo humano provenientes de 9 estados de Venezuela y Distrito Capital, se realizó un histograma de frecuencia (ver figura 14) con los intervalos tomados de Sawyer and McCarty (1978), estos son: aguas blandas (0-75) mg/L de CaCO_3 , aguas moderadamente duras (75-150) mg/L de CaCO_3 , aguas

duras (150-300) mg/L de CaCO_3 y aguas muy duras >300 mg/L de CaCO_3 , del cual puede decirse de manera aproximada que el 46% de las muestras se clasifican como aguas moderadamente duras, el 24,5 % de las muestras son aguas blandas, el 20 % representan aguas duras y un 9,5% son aguas muy duras, destacando dentro del grupo de muestras los estados Lara y Yaracuy con los valores más altos de dureza (aguas muy duras) y en contraparte las aguas blandas corresponden a los estados: Lara con el valor más bajo del grupo de muestras (LaHLA24), Zulia (ZuHL40) y predominantemente el estado Mérida en su totalidad, sólo para mencionar los estados correspondientes a los valores extremos de dureza presentados en el proyecto; es importante decir que para la normativa de calidad de aguas vigente en el país, se refleja un valor único de 500 mg/L de CaCO_3 como valor límite para el parámetro fisicoquímico de la dureza del agua para consumo humano, la descripción al detalle por estado sobre la correspondencia del grado de dureza se hará en el punto 6.3.

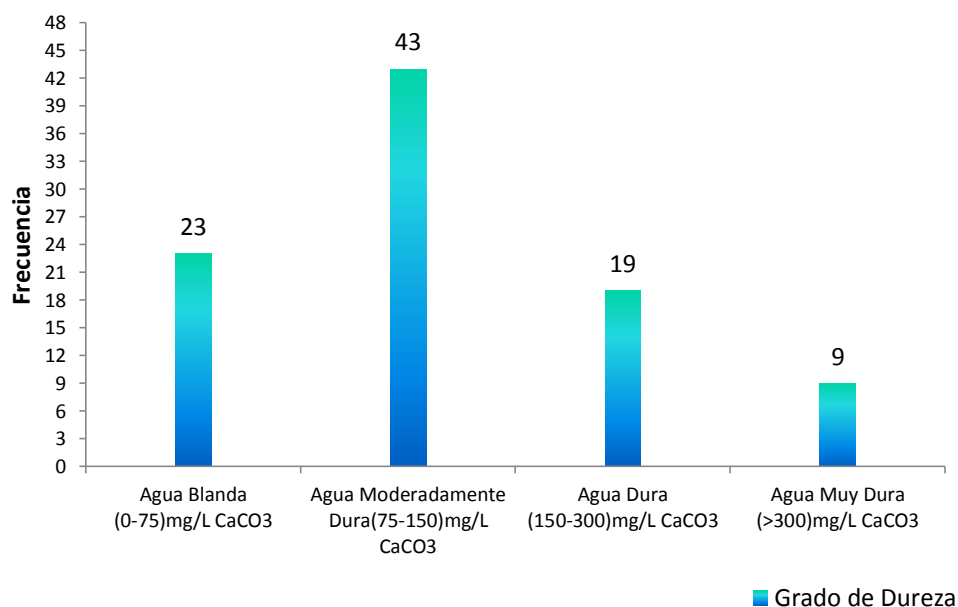


Figura 14: Histograma de grado de dureza en muestras de aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital

En cuanto a la dureza cálcica y magnésica en las muestras de agua, puede señalarse que la dureza del 66 % de las muestras es gobernada por el contenido de calcio ya que su dureza cálcica es mayor que la dureza magnésica (ver figura 15), de esta manera sólo en el 34 % de las muestras su dureza es gobernada por el contenido de magnesio, dentro de las cuales se encuentran predominantemente las muestras de agua de consumo humano que surten al Distrito Capital, estado Miranda y en menor medida los estados Apure, Mérida, Lara, Carabobo y Zulia, de cualquier manera, posiblemente estas aguas discurren por un sustrato que permite su enriquecimiento en magnesio, lo que de manera general resulta de mayor beneficio para la salud, relación que se explicará al detalle en el punto 6.4.

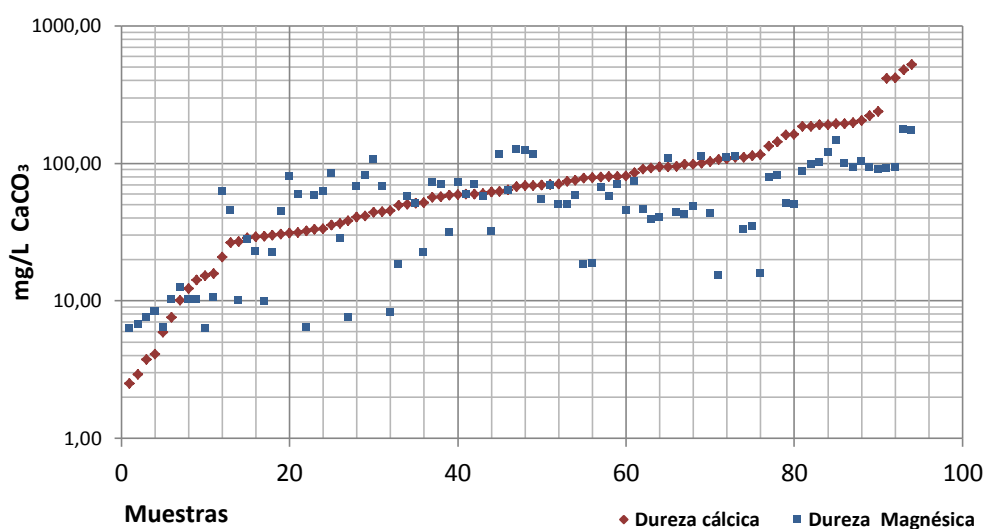


Figura 15: Tipo de dureza en muestras de agua de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital

En cuanto al pH, este representa un parámetro fisicoquímico imprescindible en la toma de muestras de aguas para consumo humano, pues muchos procesos están regulados por el, caso frecuente en el ablandamiento del agua en las plantas de potabilización con la finalidad de evitar obstrucciones en las tuberías por precipitación de carbonatos, por lo que este parámetro es



necesariamente controlado por dichas plantas, indicando en gran medida la calidad del agua a consumir. De acuerdo a la normativa de calidad del país hay un intervalo permisible de (6- 8,5) y de acuerdo a la OMS el intervalo de pH aceptable es (7-8,5), también reporta un valor máximo permisible de 9,5 (ver tabla 6). Como se observa en la tabla 28 del apéndice K todas las muestras cuya información de pH fue reportada por su planta potabilizadora correspondiente, se encuentran dentro del intervalo permisible (COVENIN, 1982).

Aun cuando el pH en aguas para el consumo humano es manejado necesariamente por las plantas potabilizadoras, por razones de calidad, en su medida refleja, entre otras cosas, la litología que alberga el cuerpo de agua que corresponde a la fuente de abastecimiento que surte a la planta potabilizadora, por tal razón para visualizar mejor esta condición se elaboró un histograma de frecuencia (ver figura 16), donde se tomó en cuenta los intervalos sugeridos por Yanes (1997), de acuerdo al pH que presentan las aguas, estos son: aguas acidas (<6,4), aguas ligeramente acidas (6,4-7,1), aguas ligeramente alcalinas (7,1-7,6), aguas alcalinas (7,6-8,2) y aguas muy alcalinas (8,2-10,9), lo que permite clasificar las aguas de acuerdo al intervalo de pH planteado, del que puede decirse que el 37 % de las muestras corresponden a aguas ligeramente acidas, el 33% de aguas ligeramente alcalinas, el 21 % representan las aguas alcalinas, el 5% son aguas acidas y el 4 % son aguas muy alcalinas; destacando los estados Zulia (muestra ZuHL40), Lara (LaHLA24), y Mérida en aguas acidas y en aguas muy alcalinas los estados Lara, Yaracuy, Apure y Miranda, solo para mencionar los estados correspondientes a los valores extremos de pH (tabla 28, apéndice K).

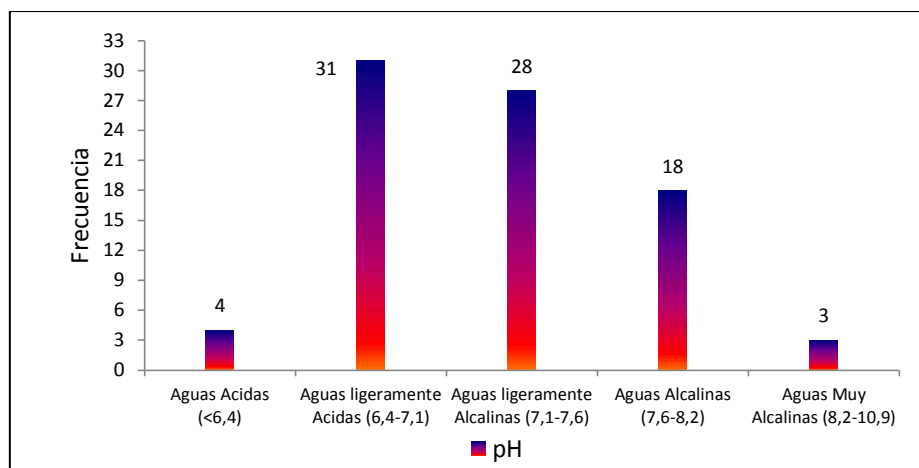


Figura 16: Histograma de tipos de agua de acuerdo al pH en muestras de agua de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital. Intervalo tomado de (Yanes, 1997).

Como se puede observar en las tablas 28, 29 y 30 del apéndice K, se reportan los valores facilitados por las plantas potabilizadoras de pH, conductividad y alcalinidad de algunas de las muestras, parámetros que en general y junto con la dureza total se relacionan, pues son un reflejo de las especies iónicas que son aportadas por la meteorización química, la precipitación atmosférica y las actividades antrópicas (Montero, 1996).

Las muestras clasificadas de acuerdo a su dureza como aguas blandas, mencionadas anteriormente, también se encuentran dentro de la clasificación de aguas ácidas de acuerdo al histograma de la figura 16, presentando a su vez valores bajos de alcalinidad y conductividad < 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en contraposición, las muestras de agua clasificadas de acuerdo a su dureza como aguas duras a muy duras presentan un pH correspondiente a aguas alcalinas a muy alcalinas, así como valores altos de conductividad y alcalinidad, específicamente las muestras del estado Lara y Yaracuy como se mencionó anteriormente.



Por su parte y de manera general las muestras también son concordantes con el tipo de fuente de abastecimiento, es decir, las aguas provenientes de fuentes de abastecimiento subterráneo presentan mayor conductividad, alcalinidad y pH, así como dureza total, reflejando una mayor concentración de iones en solución, en relación a la fuente de abastecimiento superficial, lo que será seguidamente descrito.

Las fuentes de abastecimiento representan un elemento condicionante en la gestión de un sistema de abastecimiento de agua potable, es el garante en gran medida junto con la calidad que pueda ofrecer la planta potabilizadora, para satisfacer la demanda de agua potable requerida por la mayor cantidad de población por región, por tal razón los niveles de variabilidad en la fuente y sus áreas de influencia son monitoreados con frecuencia a fin de garantizar la operación, factibilidad técnica y económica de la planta potabilizadora (Najul y Blanco, 2003).

Los procesos que caracterizan a las fuentes de abastecimiento, son procesos dinámicos, susceptibles a cambios estacionales meteorológicos, entre otros, que influyen de manera directa a fuentes de abastecimiento superficiales (ríos, lagos, quebradas, embalses (lagos artificiales)), las cuales de manera general presentan bajas concentraciones de sólidos disueltos, con velocidad de flujo variable relativamente alta en ríos y baja en lagos y embalses, adicionalmente este tipo de fuentes de abastecimiento está más expuesta a descargas de diferente índole producto de las actividades antrópicas, es importante decir que la variabilidad de la composición de estos cuerpos de agua está sujeta en gran medida a la naturaleza del material geológico por el cual discurren estas aguas; en cuanto a las fuentes de abastecimiento subterráneas (acuíferos confinados y no confinados) se caracterizan, en general, por tener un patrón de flujo estable y contener cantidades



apreciables de sólidos disueltos, gobernada por la porosidad, permeabilidad y composición del material geológico que predomine (Najul y Blanco, 2003).

En la figura 17 se observan gráficos de dispersión con los datos obtenidos de las muestras de aguas de consumo humano en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital, en función de sus fuentes de abastecimiento y por elemento (Ca, Mg, Na y K), en los cuales se demuestra lo expuesto anteriormente, donde las muestras que corresponden a las fuentes de abastecimiento subterránea, específicamente las que provienen de pozos, presentan concentraciones superiores a 10 mg/L para calcio, magnesio y sodio, destacándose dentro de su grupo la muestra procedente del estado Lara (LaHLA27a y LaHLA27b) en todos los elementos, con valores cercanos a 200 mg/L en Ca, mayores a 40 mg/L para Mg y mayores a 115 mg/L para Na, de la misma manera se destaca la muestra procedente del estado Yaracuy (YaADY47a y YaADY47b), presentando una concentración superior a 160 mg/L de Ca.

Las muestras de agua descritas anteriormente y procedentes de los estados Lara y Yaracuy corresponden a fuentes de abastecimiento subterráneas: pozos y manantiales respectivamente, que dentro de su mismo grupo son las que probablemente se encuentren en mayor equilibrio con el sustrato, en el cual se encuentra inmerso el cuerpo de agua enriquecido de dichos elementos, principalmente calcio y magnesio cuyo origen sea posiblemente carbonático, puesto que para establecer la composición química de un cuerpo de agua es preciso un estudio integrado, en vista del elevado número de variables presentes, como la interacción de las aguas con el suelo, litología dominante y el clima de la región, así como las descargas antrópicas que alteran la composición de las aguas (Barrientos *et al.*, 2000).

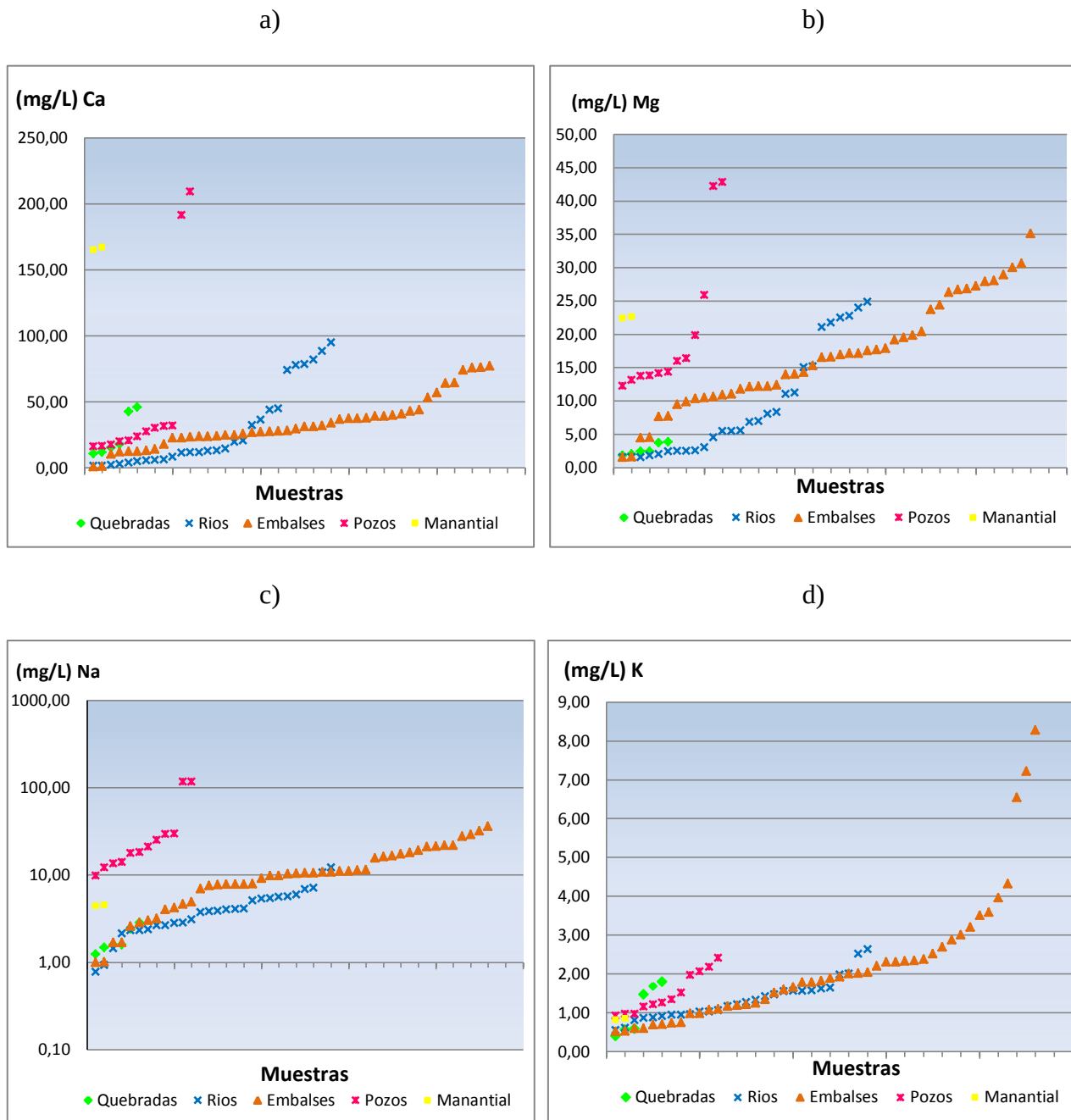


Figura 17: a) Ca, b) Mg, c) Na, d) K y fuentes de abastecimiento en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital

Respecto a las fuentes de abastecimiento superficial (embalses, ríos y quebradas), específicamente en ríos destaca un grupo de muestras que se separan del resto, en los gráficos de calcio y magnesio con los valores más altos de su grupo, entre 70 mg/L y 100 mg/L en calcio y



20 mg/L y 25 mg/L para magnesio, las mismas proceden del estado Yaracuy (YaADY42a, YaADY42b, YaADY43a, YaADY43b, YaADY45a y YaADY45b), indicando que dichos cuerpos de agua discurren por un sustrato enriquecido en calcio y magnesio; en cuanto a las concentraciones de Ca, Mg, Na y K en los embalses, como fuente de abastecimiento superficial, se encuentra un grupo de muestras que destacan con los valores más altos en concentraciones de Ca y Mg y que se separan del resto de las muestras, con valores que van desde mayores a 50 mg/L y menores de 77 mg/L para calcio y mayores de 23 mg/L hasta menores de 36 mg/L para magnesio, destacando la muestra procedente del estado Lara (LaHLA28b) como la de mayor concentración tanto para calcio como para magnesio dentro de su grupo, generalmente las concentraciones elevadas tanto de calcio como de magnesio corresponden a embalses alimentados por mezcla de aguas superficiales y subterráneas, lo que posiblemente refleja un incremento en la concentración, además de que el sustrato que contiene el agua a tratar este enriquecida con dichos elementos.

Las muestras CaHCE39a y CaHCE39b procedentes del estado Carabobo, reflejan la mayor concentración tanto de sodio como de potasio respecto al grupo de muestras cuya fuente de abastecimiento es embalse, inmersas en un grupo de altas concentraciones que van desde 15,65 mg/L a 36,06 mg/L de sodio y 2,51 mg/L a 8,27 mg/L para potasio, es preciso destacar que en la gráfica d) de la figura 17, donde se evalúa la concentración de potasio, se puede apreciar que las muestras cuya fuente de abastecimiento es embalse prevalecen respecto al resto de las fuentes de abastecimiento, esto se debe a que las fuentes de abastecimiento superficiales son más vulnerables a factores biológicos y/o aportes antrópicos que pudiesen estar enriqueciendo estos cuerpos de agua con dicho elemento.

En cuanto a la variabilidad de las concentraciones de dureza total por fuentes de abastecimiento se puede observar en la figura 18 que las mayores concentraciones de dureza corresponden a fuentes de abastecimiento subterráneas (pozos y manantiales), correspondientes a aguas con un grado de dureza muy duras en los estados Lara y Yaracuy respectivamente, así mismo las muestras de río con un grado de dureza de dura a muy dura corresponden al estado Yaracuy, indicando así que estos cuerpos de agua están en mayor equilibrio con el sustrato que las alberga, el cual está enriquecido con calcio y magnesio, en contraposición las aguas blandas están presentes en fuentes de abastecimiento superficial (ríos, quebradas y de manera minoritaria embalses) predominando las muestras procedentes del estado Mérida, sin embargo, de manera puntual también se presentaron en los estados Apure, Lara, Miranda, Vargas y Zulia, punto que será discutido de manera más amplia en la descripción por estado; es necesario resaltar que de acuerdo a diversos estudios realizados, las aguas blandas representan un posible potencial de riesgo cardiovascular y otras enfermedades en el ser humano.

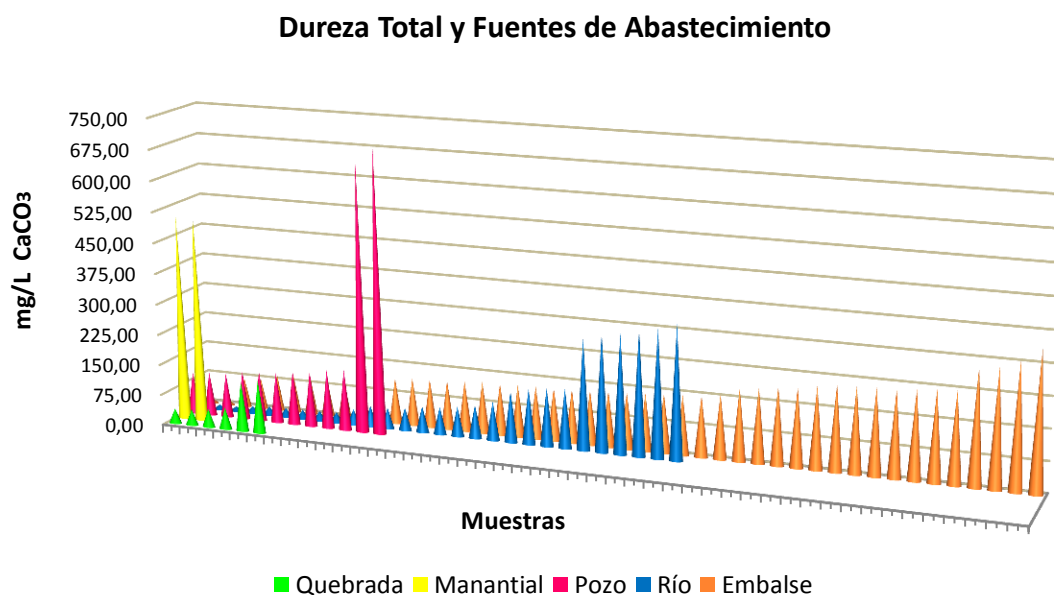


Figura 18: Dureza total y fuentes de abastecimiento en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital



6.2.1 Aguas Crudas y tratadas:

Los sistemas de potabilización del agua están constituidos por diversos procesos, de acuerdo al tipo de planta de tratamiento, desde que el agua cruda entra a la planta potabilizadora hasta su salida a la red de distribución (ver figura 6), uno de ellos, de acuerdo a su requerimiento es el proceso de ablandamiento de las aguas, donde practican la remoción de iones calcio y magnesio (reducción de la dureza) a fin de evitar obstrucciones en el sistema de tuberías, siendo dichos elementos los principales causantes de la dureza del agua (Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables, 1997), por tal razón se hace necesario conocer si el tratamiento de la planta potabilizadora afecta las concentraciones de calcio y magnesio que finalmente consume la mayor cantidad de población por región en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital.

Para visualizar mejor los resultados de las concentraciones elementales de Ca, Mg, Na y K en aguas de consumo humano antes y después del tratamiento de potabilización en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital, así como comparar los dos tipos de muestras (agua cruda y agua tratada), se realizaron cajas graficas por elemento y tipo de agua (ver figura 19), además la figura 19^a con gráficos de dispersión, que permitieron hacer tal comparación y para comprobar si existe alguna diferencia significativa entre ambas se aplicó el contraste estadístico t.

De la figura 19 puede señalarse que en el comportamiento general de las muestras pareciera no existir diferencia entre el agua cruda y el agua tratada por planta de tratamiento, lo que se corrobora en la figura 19^a, respecto a la concentración de calcio, la misma se distribuye en un intervalo de 1,00 mg/L como valor mínimo, correspondiente a la muestra LaHLA24a hasta 209,02 mg/L como valor máximo de calcio, correspondiente a la muestra LaHLA27a, ambas del

estado Lara, para el magnesio se presenta un valor mínimo de 1,52 mg/L correspondiente a la muestra MeADM6a y un valor máximo en su concentración de 42,86 mg/L en la muestra LaHLA27b, procedentes de los estados Mérida y Lara respectivamente.

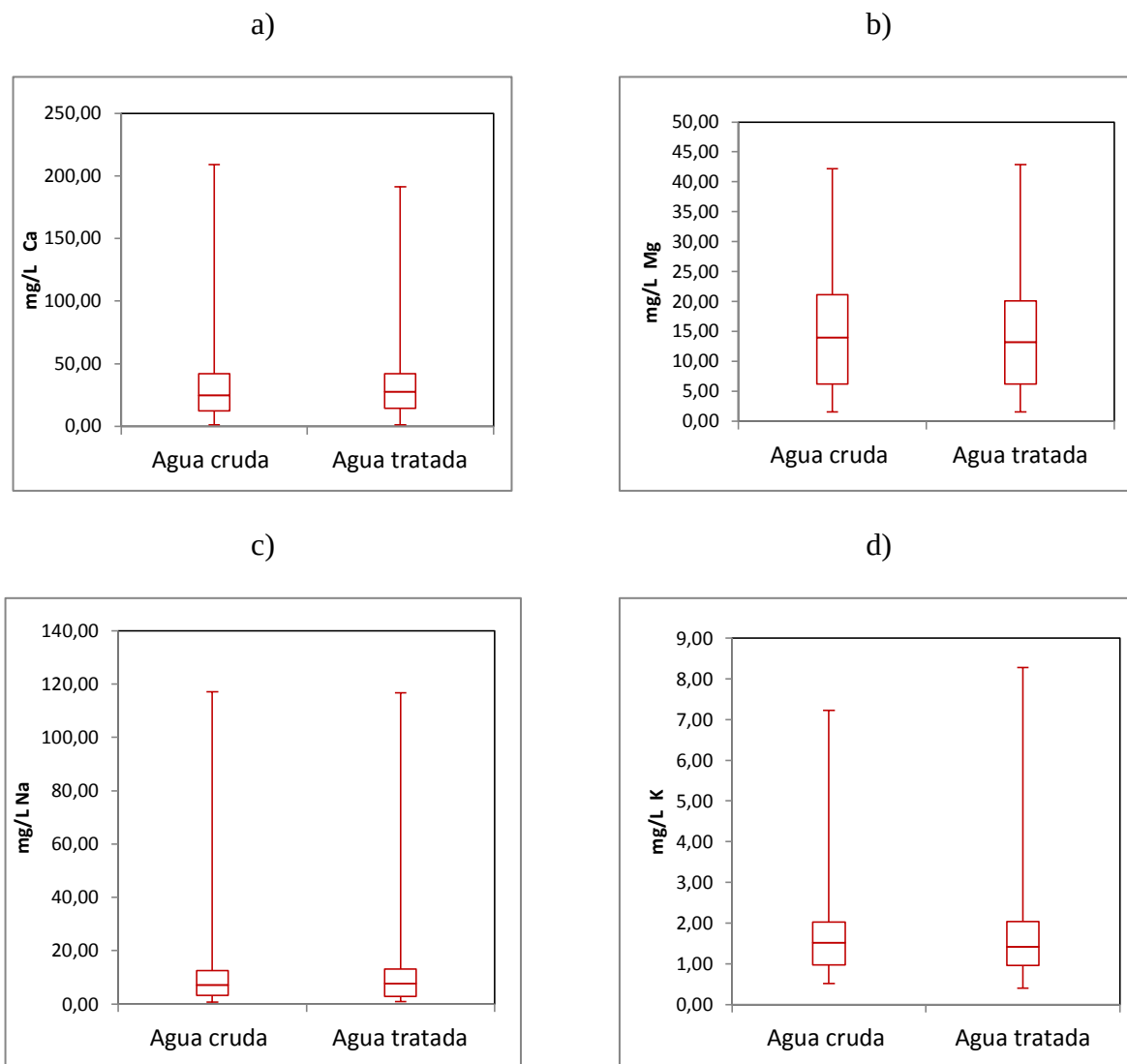
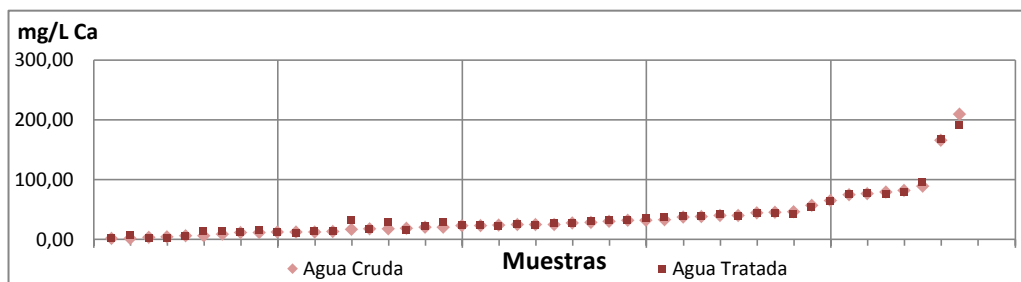


Figura 19: Cajas graficas de a) Ca, b) Mg, c) Na y d) K en aguas crudas y tratadas de 9 estados y Distrito Capital
 T Valores máximos y mínimos, — mediana, □ 5%-75%

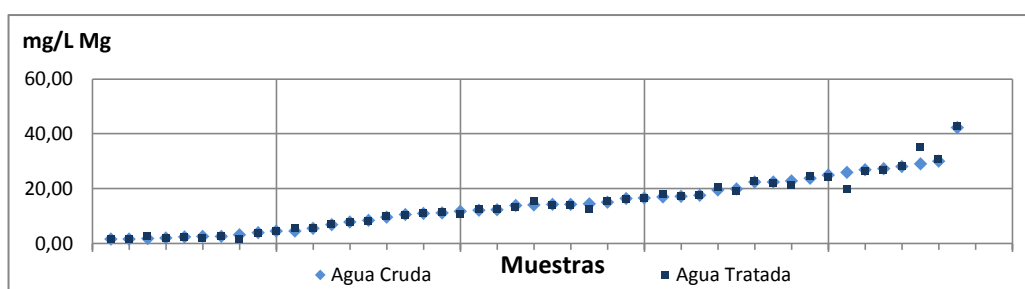
Tabla 9: Contraste estadístico en aguas crudas y tratadas por elemento

$t_{(95\%, 46)} = 2,0129$				
	Ca	K	Mg	Na
P(T<=t) calculado	0,2680	0,3957	0,6250	0,0397

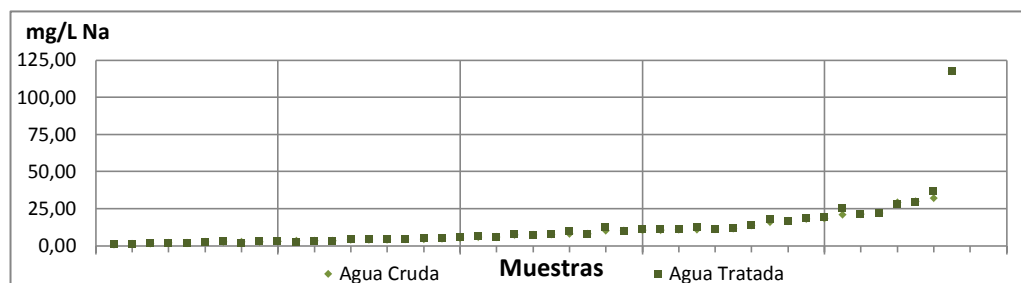
a)



b)



c)



d)

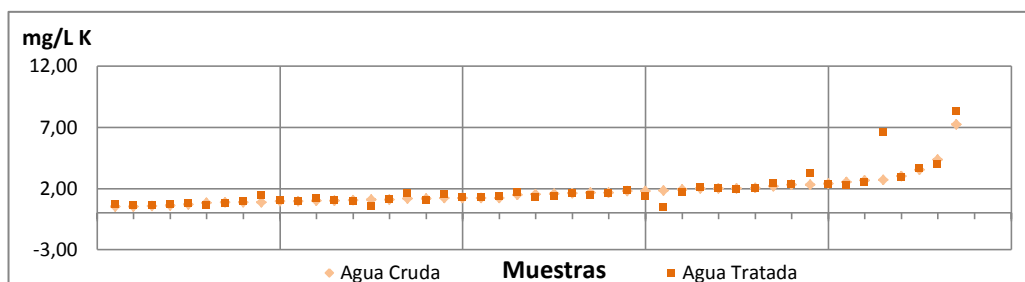


Figura 19ª: Gráficos de dispersión de a) Ca, b) Mg, c) Na y d) K en aguas crudas y tratadas de 9 estados y Distrito Capital



Las concentraciones de sodio presentan un intervalo entre 0,77 mg/L como valor mínimo (MeADM6a) y 117,15 mg/L como valor máximo (LaHLA27a), procedente de los estados Mérida y Lara respectivamente, en cuanto a la distribución del potasio, presenta un intervalo de concentración desde 0,40 mg/L (LaHLA29b) hasta 8,27mg/L (CaHCE39b), procedente de los estados Lara y Carabobo respectivamente, se puede notar que en los valores máximos de concentración de todos los elementos prevalece la misma planta de tratamiento correspondiente al estado Lara, cuya fuente de abastecimiento es subterránea (pozo), excepto para el potasio, que corresponde al estado Carabobo (fuente de abastecimiento embalses), ya que para este elemento influyen otros factores que determinan su presencia, como los antrópicos que posiblemente sea el causante de este valor para el potasio en esta zona, sin embargo en la descripción por estado se ahondará más al respecto.

Para conocer si existe una diferencia significativa entre aguas crudas y tratadas, se aplicó el contraste estadístico t de dos colas (tabla 9), siendo la hipótesis nula: $\mu_c = \mu_t$, es decir, que no hay diferencia significativa entre muestras de aguas crudas y tratadas, de esta manera la hipótesis alternativa: $\mu_c \neq \mu_t$, es decir, que si habría diferencia significativa entre dichas muestras, como se puede observar en la tabla 9, el valor de t calculado con un nivel de confianza del 95% resultó menor que el t crítico para (n-1) medidas en todos los elementos, por lo que se acepta la hipótesis nula y se concluye de manera general que no existe diferencia significativa entre muestras de aguas crudas y tratadas en todos los elementos estudiados en este proyecto (Instituto de Salud Pública-Departamento de Salud Ambiental, 2010). De lo mencionado anteriormente se puede estimar de manera general que el tratamiento que realizan las plantas potabilizadoras en los 9



estados de Venezuela y Distrito Capital no afectan las concentraciones de calcio, magnesio, sodio y potasio en las aguas de consumo humano.

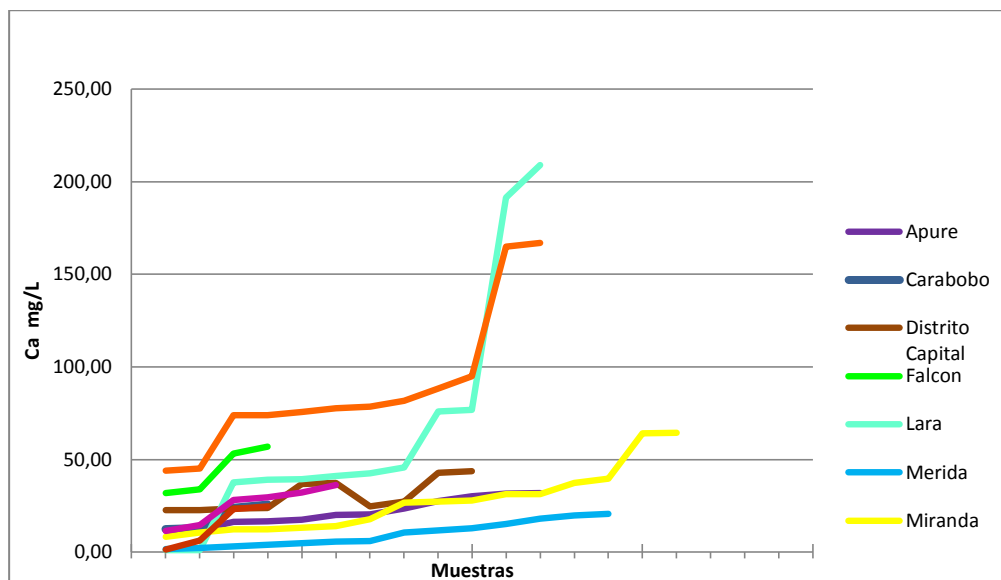
6.3 Descripción por estado

Con el fin de discernir donde se ubican las aguas de consumo humano con mayor y menor concentración por elemento, así como su dureza total, cálcica y magnésica calculadas, dentro del conjunto de muestras estudiadas, se estableció un valor de fondo regional (ver tabla 10) el cual será representativo de acuerdo a la cantidad de muestras recibidas por región, y para argumentar un poco las concentraciones encontradas, se hace uso de las figuras de la 20 a la 23, estableciendo una discusión por estado de acuerdo a las muestras de agua para consumo humano recibidas.

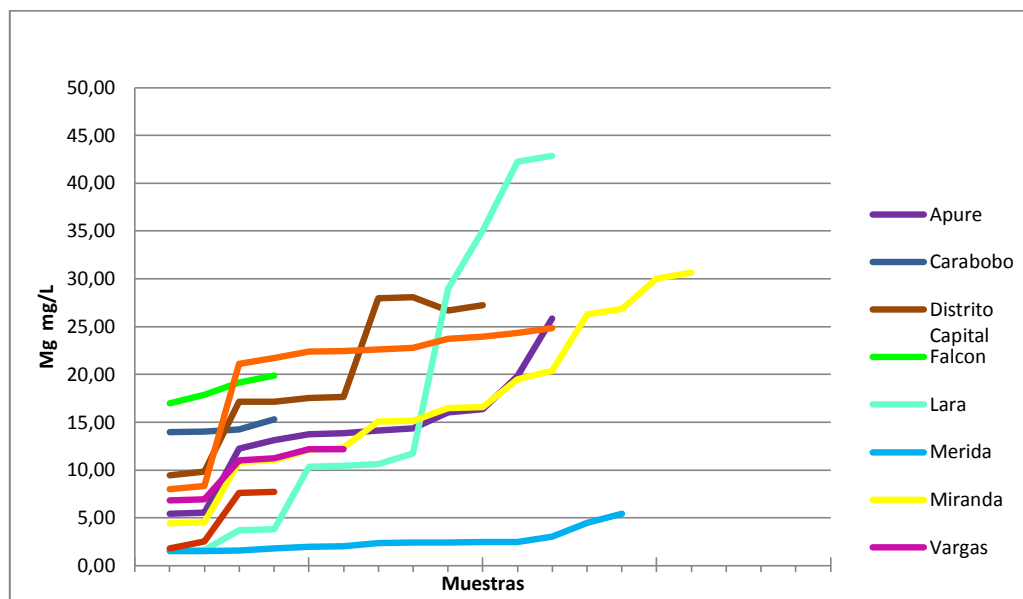
6.3.1 Apure

Las muestras enviadas por la empresa hidrológica Hidrollanos, cuya población abastecida corresponde al estado Apure (tabla 16, apéndice A), en su mayoría provienen de fuentes de abastecimiento subterráneas solo una de las plantas se surte de fuente de abastecimiento superficial (rio Apure), específicamente las muestras AHLL32a y AHLL32b, las cuales representan un contraste en su grupo; el contenido de calcio, magnesio, sodio y potasio es mucho mayor en fuentes de abastecimiento subterráneas que superficial, como se observa en la tabla 27 apéndice J, sin embargo, en las concentraciones de potasio las muestras de rio (1,56mg/L) superan las concentraciones de la mayoría de las muestras provenientes de pozo, es probable que este cuerpo de agua superficial por estar más expuesto a descargas de tipo agrícola o de influencia antrópica en general, influyen de manera directa en el valor de potasio en muestras de

rio, respecto al resto de las muestras, aunque estos valores se encuentran dentro de los valores límites de acuerdo a las normas de calidad de Venezuela (tabla 6).

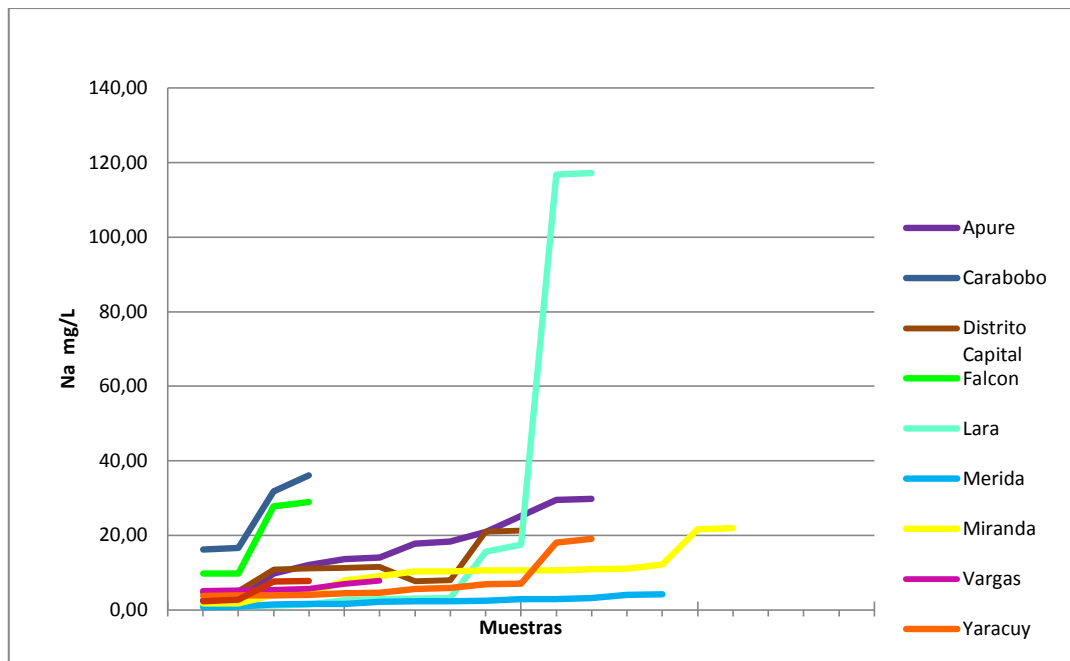


a)

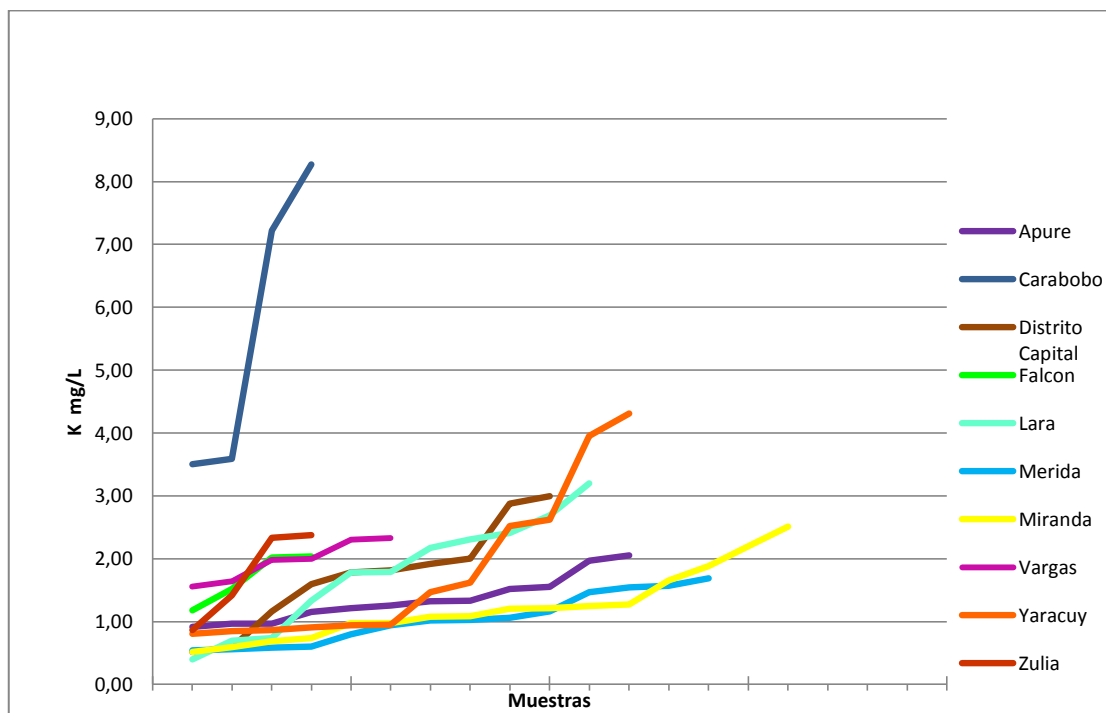


b)

Figura20: a) Calcio y b) Magnesio en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital



c)



d)

Figura 21: c) Na y d) K en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital



Tabla 10: Valores de: Mediana, MAD, Fondo y orden de abundancia estimado en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital de las plantas potabilizadoras participantes en el proyecto

		Mediana	MAD	Fondo	Orden de Abundancia estimado
Apure	Ca	20,32	5,68	11,89 - 28,75	Ca>Na>Mg>K
	Mg	13,99	1,89	11,19 - 16,80	
	Na	15,91	5,56	7,67 - 24,16	
	K	1,29	0,25	0,92 - 1,66	
Carabobo	Ca	18,64	5,79	10,06 - 27,23	Na>Ca>Mg>K
	Mg	14,14	0,16	13,91 - 14,37	
	Na	24,20	7,80	12,63 - 35,78	
	K	5,41	1,86	2,65 - 8,16	
Distrito Capital	Ca	26,07	3,36	21,09 - 31,05	Ca>Mg>Na>K
	Mg	17,58	7,92	5,84 - 29,33	
	Na	10,94	3,12	6,31 - 15,57	
	K	1,80	0,42	1,17 - 2,42	
Falcón	Ca	43,56	10,57	27,89 - 59,24	Ca>Na>Mg>K
	Mg	18,52	1,00	17,04 - 20,00	
	Na	18,81	9,00	5,46 - 32,16	
	K	1,77	0,26	1,38 - 2,15	
Lara	Ca	41,84	19,22	13,33 - 70,34	Ca>Mg>Na>K
	Mg	10,54	7,87	0,00 - 22,21	
	Na	2,92	1,80	0,25 - 5,59	
	K	1,98	0,68	0,98 - 2,99	
Mérida	Ca	8,40	4,89	1,16 - 15,65	Ca>Mg>Na>K
	Mg	2,40	0,49	1,68 - 3,13	
	Na	2,33	0,76	1,21 - 3,46	
	K	1,02	0,43	0,38 - 1,66	
Miranda	Ca	27,08	12,83	8,06 - 46,10	Ca>Mg>Na>K
	Mg	15,81	4,69	8,86 - 22,76	
	Na	10,48	1,52	8,23 - 12,73	
	K	1,15	0,29	0,71 - 1,58	
Vargas	Ca	28,83	5,47	20,72 - 36,93	Ca>Mg>Na>K
	Mg	11,12	1,08	9,52 - 12,72	
	Na	5,54	0,20	5,25 - 5,83	
	K	1,99	0,33	1,51 - 2,47	
Yaracuy	Ca	78,09	7,28	67,29 - 88,89	Ca>Mg>Na>K
	Mg	22,54	1,30	20,61 - 24,47	
	Na	5,09	1,23	3,26 - 6,92	
	K	1,21	0,38	0,64 - 1,78	
Zulia	Ca	14,84	9,17	1,25 - 28,43	Ca>Mg>Na>K
	Mg	5,08	2,59	1,23 - 8,93	
	Na	5,17	2,49	1,47 - 8,87	
	K	1,87	0,48	1,16 - 2,58	

(*) Datos en mg/L para todos los elementos

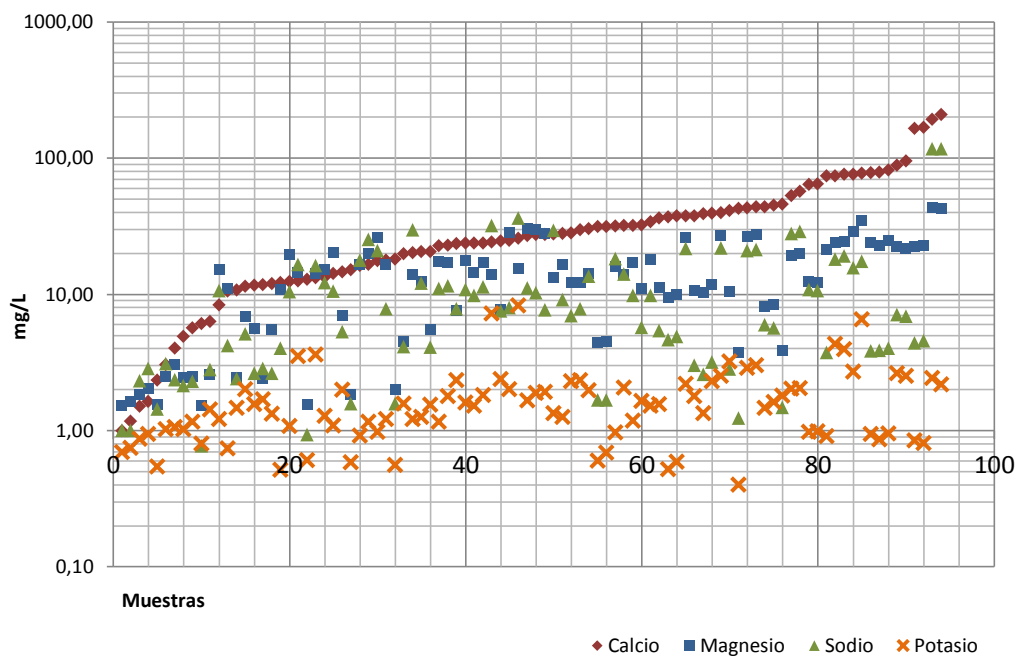


Figura 22: Distribución de Ca, Mg, Na y K en aguas de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital

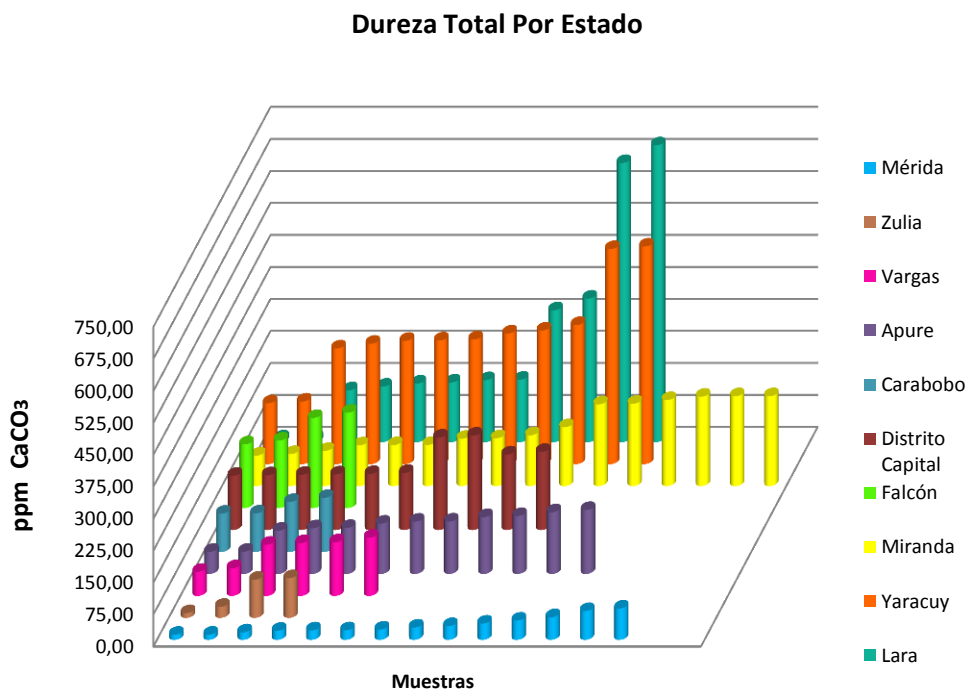


Figura 23: Dureza total por estado en muestras de agua de consumo humano de 9 estados y Distrito Capital



En cuanto a la dureza total, de manera general son aguas moderadamente duras como se observa en la figura 23 con concentraciones desde (101,58 a 150,36) mg/ L CaCO_3 , excepto las muestras AHLL32a y AHLL32b que fueron clasificadas como aguas blandas con concentraciones $\leq 52,25$ mg/ L CaCO_3 , de acuerdo a su contenido de calcio y magnesio. El valor de magnesio es < 10 mg/L, valor mínimo recomendado para su consumo, vía agua potable, que ofrece un mayor beneficio en la salud de acuerdo a diversos estudios (WHO, 2009).

La dureza total es gobernada por el contenido de calcio en la mayoría de las muestras correspondientes a este estado, excepto las muestras AHLL34a, AHLL36a, AHLL37a y AHLL37b, cuya dureza magnésica es mayor que la cálcica (ver tabla 27, apéndice J), normalmente en aguas naturales es común que predomine el ion calcio, sin embargo, esto dependerá de diversos factores que gobiernan la composición de las aguas, por lo que es probable que las muestras antes mencionadas correspondan a cuerpos de agua en mayor equilibrio con el sustrato, el cual pudiese estar constituido por carbonatos enriquecidos en magnesio.

El orden de abundancia estimado de acuerdo al cálculo de fondo regional para esta zona es $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ (tabla 10), observable en la figura 22 de manera general, es necesario retomar que las aguas provienen de fuentes subterráneas en su mayoría, por su parte la litología juega un papel determinante en la composición química de las aguas de esta región y de acuerdo al orden de abundancia estimado parece indicar que la composición química de las aguas del río y pozos, como fuentes de abastecimiento, es consecuencia de la meteorización de aluminosilicatos sódicos y carbonatos (Velásquez, 2000).



6.3.2 Carabobo

Las muestras enviadas por Hidrocentro, cuya población abastecida corresponde al estado Carabobo, proceden de fuentes de abastecimiento superficial (embalses) (ver tabla 14, apéndice A) que surten de agua potable a la mayor cantidad de población de este estado, las cuales son clasificadas como aguas moderadamente duras (ver figura 23) de acuerdo al valor de su dureza total que va desde (89,97 a 127,09) mg/L CaCO_3 , reflejando que el contenido de calcio y magnesio es relativamente alto, como se observa en la figura 20 y en la tabla 27 del apéndice J, lo que va en beneficio para su consumo, por otra parte tanto las concentraciones de sodio y aun más potasio, como se observa en la figura 21, se van diferenciando del resto de las muestras, de hecho representa el valor máximo de todo el grupo de muestras para potasio (8,27 mg/L), posiblemente por ser fuentes de abastecimiento superficial, cuya alimentación del cuerpo de agua está sometida a descargas de toda influencia antrópica de la zona, aunque es importante decir que todas las muestras están dentro de los valores límites para este elemento (tabla 6).

Las muestra CaHCE39a y CaHCE39b, cuyos valores de sodio(36,06)mg/L y potasio (8,27)mg/L, representan los valores máximos de todas las muestras para potasio, provienen del embalse Pao-Cachinche y Guataparo que a saber son afectados por actividades antrópicas, específicamente reciben tributarios a los cuales se les vierten aguas domésticas con tratamiento deficiente de la ciudad de Valencia (1,7 millones de habitantes) y aguas de desecho desde granjas avícolas y porcinas, lo que incrementan los problemas de eutrofización que enfrenta la empresa hidrológica para el tratamiento de sus aguas (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC, 2012), motivos suficientes para reflejar concentraciones altas de sodio y potasio. Las muestras CaHCE38a y CaHCE38b presentan mayor contenido de magnesio que de calcio como se puede observar en la



tabla 27 del apéndice J, lo que conlleva a tener una dureza magnésica por encima de la dureza cálcica, sugiriendo que estas muestras prevalece una litología rica en magnesio.

Aunque factores antrópicos modifican la composición de las aguas, el soporte de esa composición es consecuencia directa de la litología de la zona entre otros factores, de manera general estas cuencas están circundadas por formaciones de origen metamórfico, inmersas en el sistema de fallas de la cordillera de las costa, específicamente la falla de la victoria y valencia entre otras, pertenecen principalmente a la formación Tucutunemo que está constituida por esquistos calcáreos, cuarzo-micáceos, areniscas rosadas y grises de grano medio a fino que contienen fragmentos de cuarzo, feldespato (plagioclasa sódica y feldespato potásico), se presenta una zona discontinua pero prominente de calizas cristalinas, de grano fino y color negro, asociadas con conglomerados de cuarzo (Fundación la Salle *de ciencias naturales*, 2010). De acuerdo a las características litológicas, concordantes con el valor de fondo regional calculado para este estado, se sugiere un orden de abundancia estimado $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$ (ver tabla 10) en base a las muestras enviadas de las plantas de tratamiento que surten a la mayor cantidad de población por región del estado Carabobo.

6.3.3 Distrito Capital

La ciudad de Caracas y su área metropolitana (aproximadamente 4.000.000 de habitantes) recibe agua desde las cuencas de los ríos Tuy y Guárico, a través del “Sistema Tuy”, una compleja red de tuberías que conecta nueve embalses (apéndice D): Camatagua, Lagartijo, Taguaza, Quebrada Seca, Ocumarito, Taguacita, Macarao, La Pereza y La Mariposa. Sólo los embalses Lagartijo, Taguaza y Taguacita se localizan en áreas protegidas; el resto de ellos se encuentran impactados



por las actividades antrópicas que se realizan en sus cuencas de drenaje, reflejándose como consecuencia la eutrofización que las empresas hidrológicas, en este caso Hidrocapital, enfrentan continuamente en el proceso de potabilización (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC, 2012).

Las muestras enviadas por Hidrocapital, cuya población abastecida corresponde a Distrito Capital, provienen totalmente de fuentes de abastecimiento superficial (embalses) (ver tabla 11, apéndice A), como se mencionó anteriormente, sus aguas son clasificadas como aguas duras y moderadamente duras con valores de (127,55 a 221,72) mg/L CaCO_3 (ver figura 23), de acuerdo al cálculo de dureza total realizado, lo que sugiere concentraciones similarmente altas de calcio ($> 22\text{mg/L}$) y magnesio ($> 17\text{mg/L}$), excepto la muestra DCHCA16a y DCHCA16b que tienen un valor ligeramente por debajo de 10 mg/L de magnesio (tabla 27 apéndice J y figura 20), sin embargo de manera general reflejan una dureza cálcica y magnésica proporcionadas, lo que va en beneficio para su consumo; en cuanto a las concentraciones de sodio y potasio, se encuentran dentro de los valores del conjunto de muestras de manera general (figura 21), sin exceder los valores límites permitidos (tabla 6).

De acuerdo a los valores de fondo regional calculados por elemento (tabla 10), se estima un orden de abundancia $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K}$ similar a la distribución del grupo de muestras (figura 22), que en líneas generales son consecuencia del número de características de las fuentes de aporte que se localizan en la región, las cuales están determinadas por la diversidad de ambientes geoquímicos que dependen en gran medida de la variedad litológica, topografía y microclima, entre otros (Yanes 1997), según Ramírez 1984, el río Tuy identifica la litología que representa los procesos



de meteorización de la serranía del litoral, por consiguiente drena los esquistos calcareo-sericíticos y las calizas y metaareniscas de esa zona, presentando las mayores relaciones Ca/Na y Ca/Mg así como la mayor concentración de sulfato, lo que es indicativo de la abundancia del mineral calcita en esta litología, lo que corresponde con la abundancia estimada, de acuerdo a las medidas obtenidas de las muestras enviadas por Hidrocapital.

6.3.4 Falcón

Las muestras enviadas por Hidrofalcón, cuya población abastecida corresponde al estado Falcón proceden de fuentes de abastecimiento superficial (embalses) (ver tabla 17 apéndice A), sus aguas son clasificadas como aguas duras (figura 23), con concentraciones de (150 a 224) mg/lCaCO₃ que a su vez reflejan altas concentraciones de calcio y magnesio, específicamente >31mg/L de Ca y > 16mg/L de Mg como se observa en la figura 20 y en la tabla 27 del apéndice J, lo que va en beneficio para su consumo, de esta manera la dureza total es gobernada por la cantidad de calcio, ya que la dureza cálcica es mayor que la dureza magnésica en todas las muestras, por otra parte el valor del sodio es un poco mayor en relación al resto de las muestras (figura 21) sobretudo las muestras FaHFA30a y FaHFA30b que presentan concentraciones >27mg/L de Na y para el potasio se encuentran valores $\leq$ a 2, 04 mg/L (tabla 27 apéndice J).

Las concentraciones obtenidas en el análisis de estas aguas para el consumo humano del estado Falcón, son consecuencia en gran medida de la litología de la zona, es probable que los tributarios que van hacia los embalses drenan sobre rocas calcáreas y minerales evaporíticos que poseen una alta solubilidad, así como plagioclasas con alta proporción de albita, por lo que se observan altas concentraciones de calcio, magnesio y sodio, aunado a que por su condición de



fuelle de abastecimiento superficial, este expuesto a otro tipo de recarga de origen antrópico, de acuerdo a los resultados obtenidos, el valor de fondo arrojó una abundancia estimada para este estado $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ (tabla 10).

6.3.5 Lara

Las muestras enviadas por Hidrolara, cuya población abastecida corresponde al estado Lara son de fuentes de abastecimiento mayoritariamente superficial (Embalses y quebrada) y subterránea (pozo), sus aguas están clasificadas de acuerdo al valor de su dureza total en aguas blandas $\leq 9,62 \text{ mg/L CaCO}_3$, moderadamente duras con valores entre (121,73 y 146,52) mg/L CaCO_3 y aguas muy duras con valores entre (309,32 y 695,90) mg/L CaCO_3 , excediendo un poco el valor límite permitido (tabla 6), dureza que es gobernada por la cantidad de calcio ya que la dureza cálcica es mayor que la dureza magnésica en todas las muestras, excepto en la muestra LaHLA24a y LaHLA24b que representa las aguas blandas y presenta mayor concentración de magnesio que calcio.

Como se observa en la tabla 27 apéndice J y en las figuras 20 y 21 la muestra LaHLA27a representa el valor máximo en los elementos, Ca (209,02) mg/L , Mg (42,23) mg/L y Na(117,15) mg/L de todas las muestras de su grupo y del proyecto, muestra que procede de fuente de abastecimiento subterránea (pozo) y que por las concentraciones presentadas, se puede inferir que el cuerpo de agua está en equilibrio con el sustrato, el cual es probable que tenga una composición carbonática enriquecida en calcio y magnesio y abundancia de minerales sódicos, tal como plagioclasas alcalinas tipo albita; en cuanto a la concentración de potasio, dicha muestra disminuye abruptamente en relación a las muestras de su grupo provenientes de fuente de



abastecimiento superficial (embalses), quizá por la exposición de los mismos a descargas de diferentes fuentes antrópicas o naturales, que ocasiona que se incremente su concentración, además de la movilidad regulada que tiene el potasio, por su capacidad de acumularse en las arcillas debido a su menor radio de hidratación (Ramírez, 1980). La abundancia estimada para este estado es $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K}$, similar a la distribución general de todas las muestras (figura 22), evaluado a partir del valor de fondo regional (tabla 10), el cual es quizá uno de los más representativos debido a que las muestras provienen de gran parte de los municipios del estado Lara (tabla 13, apéndice A), dando cobertura del servicio de agua potable a la mayor cantidad de población por región.

La muestra LaHLA24a representa el valor mínimo de calcio y magnesio de todas las muestras del proyecto, seguida la muestra LaHLA24b y ambas constituyen las aguas más blandas de todo el grupo de muestras, con una dureza total de (8,76 y 9,62) mg/L CaCO_3 respectivamente, siendo sus valores de calcio de (1,00 y 1,17) mg/L y para magnesio (1,52 y 1,63) mg/L, dicha muestra proviene del embalse los Quediches, cuya localidad abastecida es Carora, municipio Torres, del cual puede decirse que históricamente sus aguas han presentado valores bajos de calcio y magnesio, en este sentido, la litología de la zona es en gran medida determinante en la composición de sus aguas, la misma constituida de manera general por: intercalación de lutitas, limolitas y areniscas, de tonos amarillentos, rojizos y grises, así como un predominio de areniscas cuarzosas, duras, densas y compactas en capas de 1m de espesor (Oliveros, 1970). Es importante mencionar que hay otras muestras (LaHLA29a y LaHLA29b) que a pesar de presentar aguas moderadamente duras, con valores de (130,32 y 121,73) mg/L CaCO_3 respectivamente, presentan valores bajos de magnesio (3,83 y 3,69) mg/L, concentraciones que están muy por



debajo del valor mínimo recomendado para el consumo de magnesio vía agua potable ($> 10\text{mg/L}$) (WHO, 2009).

6.3.6 Mérida

Las muestras enviadas por Aguas de Ejido y Aguas de Mérida, cuya población abastecida corresponde al estado Mérida (tabla 12, apéndice A), proceden de fuentes de abastecimiento superficial (ríos y quebradas), como se observa en las figuras 20 y 21 es el estado que presenta concentraciones uniformemente bajas para todos los elementos (Ca, Mg, Na y K), esto permite que sus aguas sean clasificadas como aguas blandas en su totalidad, de acuerdo a su dureza total (ver tabla 27 apéndice J y figura 23) con valores entre (12,23 y 73,79) mg/L CaCO_3 , dureza que es gobernada por el contenido de calcio, pues su dureza cálcica predomina sobre la dureza magnésica en la mayoría de las muestras, excepto en las muestras MeADM3a, MeADM3b, MeADM4a y MeADM4b, en las que su dureza magnésica es mayor que la cálcica, sin embargo, son las muestras más blandas del grupo.

Aunque no se conoce la geología de cada cuenca de drenaje que abastece a las plantas potabilizadoras, la zona pertenece a la cordillera andina (ver figura 31, apéndice C), donde hay predominio de formaciones igneo-metamórficas, sometidas a meteorización física por excelencia, de esta manera la cinética de las reacciones son más lentas para disolver los minerales por tanto la interacción roca-fluido es lenta y no hay disponibilidad de elementos como calcio, magnesio, sodio y potasio, sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos se calculó un valor de fondo regional (tabla 10), del cual se estimó un orden de abundancia que es el siguiente: $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K}$, similar a la distribución general de las muestras (figura 22).



En vista de los resultados obtenidos, el estado Mérida junto con los casos puntuales en los estados con aguas blandas, pueden ser zonas potenciales para el estudio de futuras correlaciones entre el consumo de calcio y magnesio vía agua potable y las enfermedades causadas por su deficiencia.

6.3.7 Miranda

Las muestras enviadas por Hidrocapital, cuya población abastecida pertenece al estado Miranda, corresponde a fuentes de abastecimiento superficial (ríos y predominantemente embalses) y una subterránea (pozo) en mezcla con embalse, específicamente las muestras (MiHCA18a y MiHCA18b); las aguas de este estado se pueden clasificar de acuerdo a su dureza total (ver tabla 27 apéndice J y figura 23) como aguas moderadamente duras, en su mayoría, con valores entre (75,23 y 138,31) mg/L CaCO_3 , aguas duras con valores entre (191,92 y 211,04) mg/L CaCO_3 y una muestra de agua blanda con un valor próximo a la clasificación de aguas moderadamente duras de 71,75 mg/L CaCO_3 , dicha dureza total está gobernada por el contenido de magnesio, en líneas generales, ya que predomina la dureza magnésica sobre la cálcica, excepto en 4 de sus muestras MiHCA17a, MiHCA17b, MiHCA18a y MiHCA18b en las que se invierte la proporción, revelando valores altos de calcio, específicamente la muestra que proviene de la mezcla de fuentes de abastecimiento (embalse y pozo), mostrando el mayor valor de calcio (> 64 mg/L) del grupo de sus muestras como se observa en la figura 20, en cuanto a los valores de la concentración de sodio y potasio, su comportamiento es similar al resto de las muestras como se observa en la figura 21.



Según Ramírez (1984), la litología descrita para la serranía del interior consta de una abundancia de minerales magnesianos, así como plagioclasas, cuyos ríos de la zona, entre ellos el río ocumarito, representan la dilución de los minerales de olivino, piroxenos (orto y clino) y plagioclasas, presentando una mayor relación Mg/Na y menor relación Ca/Mg , evidenciándose la predominancia del magnesio en estas aguas, específicamente en la muestra MiHCA12a y MiHCA12b que presenta el mayor valor de magnesio de su grupo ($>30\text{mg/L}$) (tabla 27, apéndice J) cuya fuente de abastecimiento es el río ocumarito. De acuerdo a los resultados obtenidos se calculó un valor de fondo regional (tabla 10), del cual se estimó un orden de abundancia que es el siguiente: $Ca > Mg > Na > K$, similar a la distribución general de las muestras (figura 22).

Es importante decir que de manera general las aguas para el consumo humano que abastece a la población del estado Miranda presenta valores para magnesio $>10\text{ mg/L}$, lo cual es recomendable para su consumo (WHO, 2009), excepto en las muestras MiHCA17a y MiHCA17b que a pesar de ser aguas clasificadas como moderadamente duras, tienen valores bajos en la concentración de magnesio (4,44 y 4,52) mg/L (ver tabla 27, apéndice J).

6.3.8 Vargas

Las muestras enviadas por Hidrocapital, cuya población abastecida pertenece al estado Vargas corresponden a fuentes de abastecimiento superficial (embalses y predominantemente ríos), estas aguas para el consumo humano pueden clasificarse como aguas moderadamente duras en su mayoría con concentraciones desde (120,34 a 136,87) mg/L CaCO_3 y aguas blandas de $\leq 65,04\text{ mg/L CaCO}_3$ (tabla 27 apéndice J), dureza que está gobernada por su contenido de calcio, siendo los valores de dureza cálcica mayores que los de dureza magnésica en todas las muestras, en



cuanto al contenido tanto de sodio como potasio es mayor en fuentes de abastecimiento tipo embalses por su mayor exposición a descargas de tipo antrópico, sin embargo su tendencia general es similar al resto de las muestras como se puede observar en las figuras 20 y 21 por lo que su abundancia estimada por elemento refleja una distribución similar al resto de las muestras (figura 22) $Ca > Mg > Na > K$ de acuerdo al valor de fondo regional calculado.

Como se ha dicho anteriormente la composición de las aguas de una zona obedece en gran medida a la composición del sustrato por el cual drenan sus aguas, las aguas blandas de este grupo, pertenecen a la fuente de abastecimiento río Naiguatá, el cual abastece a la población de Naiguatá y parte del Litoral Central, la descripción litológica de esta zona es compleja, sin embargo de manera general predominan rocas ígneo-metamórficas tipo esquisto (o filita) cuarzo-muscovítico-feldespático (clorítico) así como metaarenisca y metaconglomerado también cuarzo-feldespático-micáceo (código geológico de Venezuela), por lo que no hay mucha disponibilidad de sus aguas en enriquecerse con elementos como calcio y magnesio, caso contrario cuando abundan elementos es por la disponibilidad de las fases solubles de los mismos, independientemente si su fuente de abastecimiento sea embalse o ríos, ya que es de gran importancia la carga mineral que traen sus afluentes. Es importante decir que de manera general las aguas para el consumo humano que abastece a la población del estado Vargas presenta valores para magnesio >10 mg/L, lo cual es recomendable para su consumo (WHO, 2009), excepto en las muestras VaHCA8a y VaHCA8b.



6.3.9 Yaracuy

Las muestras enviadas por Aguas de Yaracuy, que surten de agua potable a la mayor cantidad de población de esa región, pertenecen a fuentes de abastecimiento superficial (embalse, mayoritariamente ríos) y subterránea (manantiales) (ver tabla 18, apéndice A), dichas muestras se caracterizan de acuerdo a su dureza total por: aguas moderadamente duras con valores de (142,79 a 146,88) mg/L CaCO_3 , aguas duras desde (271,43 a 292,55) mg/L CaCO_3 y aguas muy duras desde (306,55 a 510,33) mg/L CaCO_3 (figura 23), dureza que es gobernada por el contenido de calcio, pues su dureza cálcica es superior a la dureza magnésica en todas sus muestras (ver tabla 27, apéndice J).

La muestra YaADY47b seguida de YaADY47a representan las muestras con mayor contenido de calcio en su grupo (167,05 y 164,97) mg/L respectivamente y una de las mayores a nivel general (ver figura 20), dichas muestras proceden de manantiales, los cuales son considerados como descargas subterráneas que funcionan como alimentación de corrientes superficiales (Najul y Blanco, 2003), por tal razón es probable que sus aguas estén en mayor equilibrio con el sustrato rico en rocas carbonáticas con alto contenido de calcio y en menor medida de magnesio, puesto que el valor de magnesio no destaca dentro del grupo de muestras aunque es $> 22\text{mg/L}$, en cuanto al valor de sodio y potasio en estas muestras, se observa que disminuyen abruptamente, siendo las más altas en estos elementos las muestras provenientes de la fuente de abastecimiento de embalse (YaADY44a y YaADY44b) quizá por estar más expuesto a descargas de origen antrópico.



De acuerdo a los resultados obtenidos por elemento se calculó un valor de fondo regional (tabla 10), del cual se estimó un orden de abundancia que es el siguiente: $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K}$, similar a la distribución general de las muestras (figura 22). La gran mayoría de las muestras de agua para el consumo humano del estado Yaracuy presentan valores $> 10\text{mg/L}$ para Mg lo que es de beneficio para su consumo (WHO, 2009), excepto la muestra YaADY46a y YaADY46b que a pesar de ser clasificada como aguas moderadamente duras, de acuerdo a su dureza total, presentan un valor de Mg (8,33 y 8,02) mg/L, respectivamente, un poco menor al recomendado, ya que la dureza es gobernada por la cantidad de calcio, por tal razón es necesario no solamente conocer la clasificación de las aguas de acuerdo a su dureza total, sino que elemento gobierna esa dureza, a fin de saber si va en beneficio o en detrimento de la salud en general.

6.3.10 Zulia

Las muestras de agua para el consumo humano enviadas por Hidrolago, cuya población abastecida es el estado Zulia (tabla 15, apéndice A) tienen por fuente de abastecimiento: embalse y mezcla de río y pozos, las mismas son caracterizadas de acuerdo a su dureza total como aguas blandas con valores de (11,30 y 26,19) mg/L CaCO_3 y moderadamente duras (89,79 y 93,34) mg/L CaCO_3 (figura 23), dureza que es gobernada por el contenido de calcio en la mayoría de sus muestras, excepto en la muestra ZuHL40a que su dureza magnésica es mayor que la cálcica (ver tabla 27, apéndice J).

Las aguas que proceden de la fuente de abastecimiento superficial (embalse) presenta mayores concentraciones en todos los elementos analizados (Ca, Mg, Na y K) y por tanto su dureza también, respecto a las aguas que proceden de la fuente de abastecimiento (mezcla río y pozo),



esto es posible ya que el principal afluente del embalse tulé es el río Cachirí, descrito en la formación Guasare cuya litología consiste principalmente en lutitas gris oscuro, arenosas, macizas o laminadas, areniscas marrón claro, calcáreas y glauconíticas, limolitas y en menor proporción caliza arenosa gris (Código Geológico de Venezuela), lo que pudiese estar enriqueciendo sus aguas; por su parte las aguas que presentan menores concentraciones de (Ca, Mg, Na y K) proceden del río Tarra como fuente de abastecimiento principal, el cual está inmerso dentro de la formación el Rosario, litológicamente se compone de conglomerados arenosos, gravas y arenas cuarzosas gruesas de color pardo, pardo rojizo y marrón claro. Los conglomerados arenosos contienen hasta un 70% de clastos gruesos de cuarzo y menor proporción de clastos graníticos, con alto contenido de ortoclasa, clastos de esquistos y volcánicos, en una matriz de arena gruesa a fina (Código geológico de Venezuela), lo que refleja el poco aporte de elementos calcio, magnesio, sodio y potasio a sus aguas.

De acuerdo a los resultados obtenidos por elemento se calculó un valor de fondo regional (tabla 10), del cual se estimó un orden de abundancia que es el siguiente: $Ca > Mg > Na > K$, similar a la distribución general de las muestras (figura 22), es importante decir que aunque dentro del grupo de muestras hay unas que se clasifican como aguas moderadamente duras (tabla 27 apéndice J) el contenido de Magnesio de todas las muestras de la zona es $< 10\text{mg/L}$, valor mínimo que se recomienda consumir, vía agua potable para el beneficio de la salud (WHO, 2009).



6.4 Variabilidad en las concentraciones de calcio, magnesio y dureza total en aguas de consumo humano, procedentes de 47 plantas potabilizadoras en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital, como posibles elementos incidentes en la salud

La industria de agua potable, no sólo en Venezuela sino en cualquier parte del mundo, trabaja en función de aplicar tratamientos a los cuerpos de agua (que constituyen sus fuentes de abastecimiento) enfocados de manera eficaz en el control biológico, bacteriológico, subproductos de desinfección y otros contaminantes, asegurando así la ausencia o la presencia limitada de algunas sustancias indeseables, que impiden que el agua sea potable de acuerdo a la normativa legal imperante a nivel nacional e internacional, basada en el concepto de calidad de agua actual. Sin embargo, elementos esenciales presentes en los cuerpos de agua de manera natural, no tóxicos en concentraciones habituales y posiblemente beneficiosos para la salud, continúan siendo inapreciables; el calcio y magnesio como elementos esenciales, presentes de manera dominante en las aguas naturales y su efecto beneficioso en la salud, ha sido estudiado desde la década de los años 50, sin embargo, el conocimiento adquirido no ha tenido aplicabilidad, en este sentido y partiendo del enfoque de calidad de agua actual, puede decirse que el agua potable es segura para su consumo, pero no puede decirse si es realmente beneficiosa para la salud (National Institute of Public Health, 2003).

Es importante decir que estudios realizados no recomiendan el consumo de aguas blandas ($<75\text{mg/L CaCO}_3$), pues se ha demostrado que el mismo va en detrimento de la salud (National Institute of Public Health, 2003); Kousa 2004 encontró en su estudio, antes descrito, que el incremento en la dureza del agua en una unidad disminuyó el riesgo de infarto al miocardio

agudo en 1%, además no sólo en el caso de enfermedades cardiovasculares, sino también cáncer colorectal, hipertensión, diabetes, entre otros, así mismo se ha demostrado que cocinar alimentos (verduras, carnes, cereales, etc.) con estas aguas, ocasiona la remoción de sus nutrientes, produciendo una menor ingesta, vía alimentos de calcio y magnesio, entre otros elementos esenciales (WHO, 2009), en este sentido y de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio de aguas para consumo humano procedentes de 9 estados de Venezuela y Distrito Capital, que abarcó un total de 47 plantas de tratamiento, puede decirse que las aguas más blandas corresponden a las procedentes del estado Mérida en su totalidad (ver figura 24), así como también casos puntuales de algunas plantas de tratamiento de los estados Lara (LaHLA24), Zulia (ZuHL40), Apure (AHLL32), Vargas (VaHCA8) y Miranda (MiHCA21b) (ver tabla 27, apéndice J).

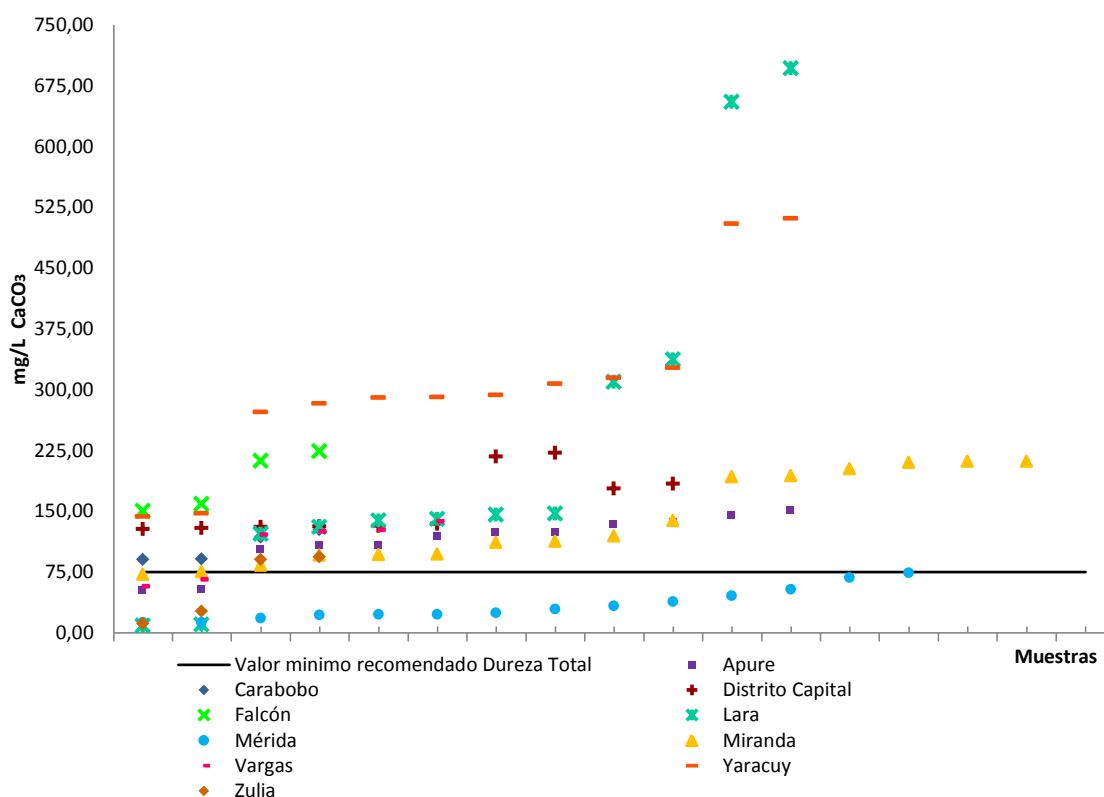


Figura 24: Valor mínimo recomendado de dureza Total para un mayor beneficio en la salud y dureza total en las 47 plantas potabilizadoras participantes en el proyecto



La mayoría de la población, tanto en países desarrollados como en desarrollo consumen niveles bajos de magnesio y calcio vía alimento, ya que la dieta diaria la constituyen en su mayoría alimentos refinados, los cuales no contienen la cantidad de nutrientes requerida, alimentos que cada día, de manera lamentable, tienen mayor demanda en el ritmo de vida actual, aunado a esto es conocido que la biodisponibilidad es menor vía alimentos que vía agua potable, alrededor de un 30% mayor de absorción vía agua potable en el caso del magnesio (National Institute of Public Health, 2003). Por tal razón diversos estudios demuestran que el consumo tanto el calcio como magnesio, vía agua potable, resulta beneficioso en la salud, pues se ha encontrado una disminución tanto en la morbilidad como en la mortalidad por enfermedades cardiovasculares, cáncer colorectal, padecimientos neurológicos, entre otras enfermedades, en zonas donde el consumo de calcio y magnesio vía agua potable, es alto (WHO, 2009).

A pesar que no se ha establecido un valor único y definitivo respecto al consumo ideal de calcio y magnesio vía agua potable, múltiples estudios recomiendan valores mínimos de consumo para el magnesio entre (8 y 10) mg/L y para el calcio entre (20 y 30) mg/L (National Institute of Public Health, 2003). En este sentido para este proyecto se quiso observar cuales muestras se encontraban por debajo de estos valores recomendados, específicamente 10mg/L para Mg y 20mg/L para calcio como valores mínimos de consumo vía agua potable.

La dureza total puede estar gobernada por el contenido de calcio o magnesio, como se discutió en la descripción por estado hay muestras que aunque sean clasificadas como moderadamente duras, presentan bajas concentraciones de calcio o magnesio, de la cual es importante conocer su

procedencia a fin conocer las zonas potencialmente calificadas para estudios posteriores en cuanto a la posible relación entre el contenido de calcio y magnesio y su injerencia en la salud.

Como se puede observar en la figura 25 las muestras que corresponden a valores $<20\text{mg/L}$ de Ca son las procedentes de los estados: Mérida en su totalidad, Lara (LaHLA24), Zulía (ZuHL40), Apure (AHLL32), (AHLL36a), (AHLL37), Carabobo (CaHCE38), Vargas (VaHCA8) y Miranda (MiHCA13a), (MiHCA19), (MiHCA20), (MiHCA21) (ver tabla 27, apéndice J), como se puede notar no todas las muestras corresponden a la clasificación de aguas blandas, citadas anteriormente.

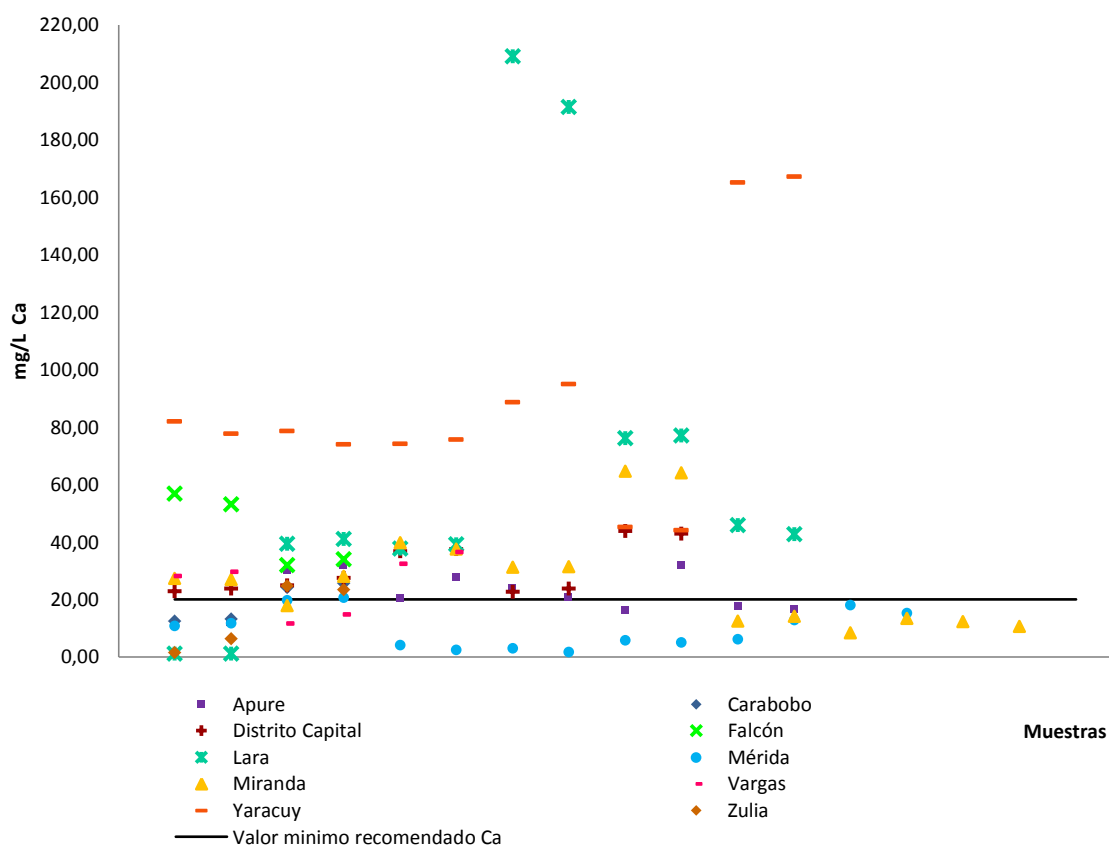


Figura 25: Valor mínimo recomendado de Calcio para un mayor beneficio en la salud y dureza total en las 47 plantas potabilizadoras participantes en el proyecto



Para magnesio resulta mucho más fiable aseverar que al consumir mayor cantidad de magnesio se reducen en gran medida el riesgo ante ciertas enfermedades, pues aunque no se haya demostrado su causalidad junto con el calcio en el consumo vía agua potable, es reconocido ampliamente su efecto cardioprotector (WHO, 2009), además de mitigar la diabetes tipo II, disminuir la intensidad de dolor en pacientes con migraña, entre otros beneficios (National Institute of Public Health, 2003). Por tales razones es importante visualizar aquellas muestras de agua de las 47 plantas de tratamiento de los 9 estados de Venezuela y Distrito Capital que presentan valores menores a 10mg/L de Mg para futuras correlaciones de interés.

Como se puede observar en la figura 26 las muestras que se encuentran por debajo del valor mínimo recomendado para el consumo de magnesio vía agua potable, corresponden a los siguientes estados: Mérida y Zulia en su totalidad de muestras, Lara (LaHLA24) y (LaHLA29) , Apure (AHLL32), Distrito Capital (DCHCA16), Vargas (VaHCA8) y Miranda (MiHCA17) y Yaracuy (YaADY46), (ver tabla 27, apéndice J), como se puede notar no todas las muestras corresponden a la clasificación de aguas blandas, ni a las que presentan concentraciones menores a 20mg/L para calcio, citadas anteriormente.

Es importante decir que toda la información recolectada en este proyecto sobre la determinación de calcio y magnesio en aguas de consumo humano como posibles elementos incidentes en la salud, en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital se encuentra plasmada en su mayoría en el capítulo de los apéndices, particularmente las especificaciones de las plantas de tratamiento de la zona de estudio por estado, así como el resultado de la determinación de los elementos Ca, Mg, Na , K y el cálculo de la dureza total, cálcica y magnésica de las 94 muestras de agua

correspondientes a las 47 plantas de tratamiento participes en el proyecto, conformando así información que puede ser usada en la elaboración de una base de datos – georeferenciada – sobre el consumo de calcio, magnesio, sodio y potasio directo, vía agua potable, a las poblaciones que se sirven de estas aguas, en los 9 estados de Venezuela y Distrito Capital.

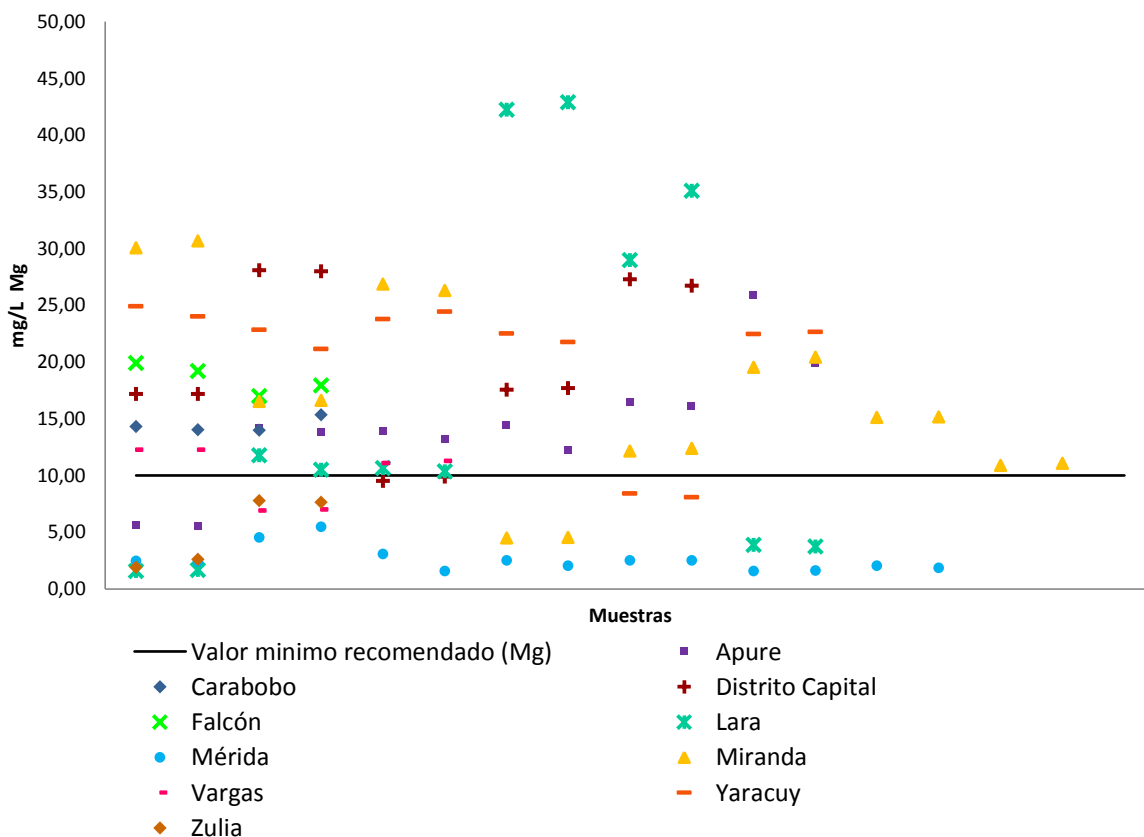


Figura 26: Valor mínimo recomendado de Magnesio para un mayor beneficio en la salud y Magnesio en las 47 plantas potabilizadoras participes en el proyecto



7. CONCLUSIONES

En concordancia con la presentación e interpretación de los resultados sobre la determinación de calcio, magnesio, sodio y potasio en aguas de consumo humano como posibles elementos incidentes en la salud, en 9 estados de Venezuela y Distrito Capital se derivan las siguientes conclusiones:

1. El intervalo de concentraciones de Ca, Mg, Na, K y dureza total en las muestras de aguas analizadas es: para Ca (1,00-209,02) mg/L, Mg (1,52-42,86) mg/L, Na (0,77-17,15) mg/L, K (0,40-8,27) mg/L y dureza total (8,76 – 695,90) mg/L CaCO_3 .
2. Las aguas de consumo humano involucradas en el proyecto, presentan una amplia variación de acuerdo a su nivel de dureza total, desde aguas blandas a muy duras. Dentro de las aguas blandas destacan los estados: Lara (LaHLA24) con el valor más bajo del grupo de muestras (8,76 mg/L CaCO_3), Zulia y predominantemente el estado Mérida en su totalidad, en contraste las aguas muy duras se encuentran en los estados Lara LaHLA27a (695,90 mg/L CaCO_3) y Yaracuy YaADY47b (510,33 mg/L CaCO_3) con los valores más altos de dureza total.
3. La dureza total del 66% de las muestras es gobernada por la cantidad de calcio, así el 34 % de las muestras es gobernado por la cantidad de magnesio, donde destacan con mayor frecuencia, las plantas potabilizadoras que surten de agua potable a los estados Miranda y Distrito Capital, con prevalencia en dureza magnésica, lo que va en beneficio de la salud de las poblaciones que se sirven de estas aguas.



4. No existe diferencia significativa entre muestras de aguas crudas y tratadas en todos los elementos estudiados en este proyecto, de lo que se puede estimar de manera general que el tratamiento que realizan las 47 plantas potabilizadoras en los 9 estados de Venezuela y Distrito Capital no afectan drásticamente las concentraciones de calcio, magnesio, sodio y potasio en las aguas de consumo humano.
5. De acuerdo a los valores de fondo regional calculados por elemento, se estimó que el orden de abundancia para la mayoría de los estados es $Ca > Mg > Na > K$ que en líneas generales son consecuencia del número de características de las fuentes de aporte que se localizan en cada región, las cuales están determinadas por la diversidad de ambientes geoquímicos que dependen en gran medida de la variedad litológica predominante.
6. Las muestras que corresponden a valores $< 20\text{mg/L}$ de Calcio, valor mínimo recomendado para el consumo vía agua potable, son las procedentes de los estados: Mérida en su totalidad, Lara (LaHLA24), Zulia (ZuHL40), Apure (AHLL32), (AHLL36a), (AHLL37), Carabobo (CaHCE38), Vargas (VaHCA8) y Miranda (MiHCA13a), (MiHCA19), (MiHCA20), (MiHCA21).
7. Las muestras que se encuentran por debajo del valor mínimo recomendado (10mg/L) para el consumo de magnesio vía agua potable, corresponden a los siguientes estados: Mérida y Zulia en su totalidad de muestras, Lara (LaHLA24), (LaHLA29) , Apure (AHLL32), Distrito Capital (DCHCA16), Vargas (VaHCA8), Miranda (MiHCA17) y Yaracuy (YaADY46)



8. Las regiones potencialmente calificadas para futuros estudios de correlación de aguas blandas y su efecto sobre la salud son: el estado Mérida, y puntualmente los estados Lara, Apure, Zulia, Vargas y Miranda.

9. Toda la información registrada en este proyecto, tanto la determinada analíticamente sobre las concentraciones de los elementos Ca, Mg, Na, K y la cantidad de dureza total, cálcica y magnésica calculada, así como la información actualizada, enviada por las plantas de tratamiento de agua potable, representan un aporte que puede ser usado en la elaboración de una base de datos – georeferenciada – sobre el consumo de calcio, magnesio, sodio y potasio, vía agua potable, a las poblaciones que se sirven de estas aguas, en los 9 estados de Venezuela y Distrito Capital.



8. RECOMENDACIONES

Con la intención de aportar información que contribuya a mejorar e incrementar el estudio sobre el consumo de los elementos: calcio, magnesio, sodio y potasio, vía agua potable, y su repercusión en la salud en Venezuela, se presentan las siguientes recomendaciones:

1. Hacer estudios al detalle por región, sobre las concentraciones de calcio y magnesio, así como la dureza en aguas de consumo humano, a fin de que el valor de fondo sea más representativo y focalizar las zonas de manera más precisa que consumen menores cantidades de estos elementos.
2. Las fuentes de abastecimientos subterráneas presentan mayor concentración de calcio y magnesio, en este sentido, pueden ser tomadas en cuenta en proyectos cuyo propósito sea incrementar la dureza total en aquellas zonas donde el agua es blanda, en beneficio de la salud pública.
3. Hacer estudios de correlación entre aguas blandas y su efecto sobre la salud en los estados: Mérida en su totalidad, y puntualmente los estados Lara, Apure, Zulia, Vargas y Miranda, donde predominen las aguas blandas.
4. Trabajar de manera multidisciplinaria para encontrar los valores mínimos de consumo requerido de calcio y magnesio, vía agua potable, de acuerdo a las necesidades de nuestra población, en función de mejorar la calidad de vida.



9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Barrientos, Y.; González, D.; Urbani, F. (2000). Estudio Hidrogeoquímico de los manantiales: Cumbotico y Cumbote, Colonia Tovar, estado Aragua, Venezuela. *Ecotrópicos Sociedad Venezolana de Ecología* [Revista en línea], 13 (2), 81-89. Consultado el 17 de Diciembre de 2008 en <http://www.saber.ula.ve/ecotropicos/>
- Bunnell, J.; Finkelman, R.; Centeno, J. (2007). Medical Geology: a globally emerging discipline. *Geologica Acta*, 5 (3), 273-281.
- Código Geológico de Venezuela. (2010). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.pdv.com/lexico/>
- Custodio, E.; Llamas, M. (1976). *Hidrología subterránea* Barcelona: Ediciones Omega.
- CYTED programa Iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo. (2009). *Aspectos prácticos de la validación e incertidumbre en medidas químicas* [Libro en línea]. Consultado el 24 de Julio de 2011 en: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/330>
- Díez, M. (2006). *Valores de Fondo de elementos traza en suelos de la provincia de Granada* [Tesis Doctoral en línea]. Universidad de Granada, España. Consultada el 24 de Julio de 2012 en: <http://0-hera.ugr.es.adrastea.ugr.es/tesisugr/16526946.pdf>
- Dissanayake, C.; Chandrajith, R. (1999). Medical geochemistry of tropical environments, 47 (reviews), 219-258.
- Finkelman, R.; Skinner, C.; Plumlee, G. (2001). Medical Geology. *Geotime*, Nov.
- Förestner, U.; Wittman, G. (1981). *Metal Pollution in the Aquatic Environment* (Second Edition). Berlin, Alemania: Springer-Verlag.



- Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. (2012). *Diagnóstico del agua en las Américas* [Libro en línea]. Consultado el 24 de Julio de 2012 en: <http://www.ianas.org/water/book/chile.pdf>
- Franson, M. (1992). *APHA-AWWA-WPCF Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales* (17ma ed.). Madrid: Díaz de Santos.
- Fundación la Salle *de ciencias naturales*. (2010). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.proyectocuencas.uc.edu.ve/Documentos/Informe%20CUENCA%20RIO%20PAO%20VERSION%20FINAL%20EMLDLC.pdf>
- Gomes, C.; Silva, J. (2007). Minerals and clay minerals in medical geology. *Applied Clay Science*, (36), 4–21.
- Havulinna, A.; *et al.* (2008). Geographic Patterns of Incidence of Ischemic Stroke and Acute Myocardial Infarction in Finland During 1991–2003. *Ann Epidemiology*, (18), 206–213.
- Hem, J. (1986). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water* (Third Edition). U.S.: Geological Survey Water-Supply 2254.
- Hernández, E. (2005). *Hidrogeoquímica de las aguas formacionales de un transecto en dirección sureste en el área Guafita- La Victoria, subcuenca de Apure*. Tesis de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Hernández, M. (2007). *Estudio Geoquímico de las aguas subterráneas al sur de Calabozo, estado Guárico, Venezuela*. Tesis de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Jenkins, D.; Snoeyink, V. (2002). *Química del Agua* (8va. Edición). México: Limusa.



- Instituto de Salud Pública-Departamento de Salud Ambiental. (2010). *Validación de métodos y determinación de incertidumbre de la medición: "Aspectos generales sobre la validación de métodos"* [Página web en línea]. disponible en: <http://www.ispch.cl/>
- International Medical Geology. (2004). [Página web en línea]. Disponible en: http://www.medicalgeology.org/pages/public/publications/page_Publications.htm
- Kobayashi, J. (1957). On geographical relationship between the chemical nature of river water and death rate from apoplexy. *Berichte Ohara Inst. Landwirtschaft. Biol. Okyama Univ.* (11), 12-21.
- Kousa, A.; Moltchanova, E.; Viik-Kajander, M. (2004). Geochemistry of ground water and the incidence of acute myocardial infarction in Finland. *Journal of Epidemiology and Community Health*, (58), 136-139.
- Kousa, A.; Havulinna, A.; Moltchanova, E. (2006). Calcio: Magnesium ratio in local groundwater and incidence of acute myocardial infarction among males in rural Finland. *Environmental Health Perspectives*, 114 (5), 730-734.
- Kousa, A.; Havulinna, A.; Moltchanova, E. (2008). Magnesium in well water and the spatial variation of acute myocardial infarction incidence in rural Finland. *Applied Geochemistry*, (23), 632-640.
- Kousa A.; Puustinen N.; Karvonen, M. (2012). The regional association of rising type 2 diabetes incidence with magnesium in drinking water among young adults. *Environmental Research*, (112), 126–128.
- Lanas, F.; *et al.* (2007). Risk factors for acute myocardial infarction in Latin America: the INTERHEART Latin American study. *Circulation Journal of the American Heart*



Association, 115 (9), 1067-1074.

- López, S.; Garrido, F. y Hernández, M. (2000). Desarrollo histórico de la epidemiología: su formación como disciplina científica. *Journal: Salud pública de México* [Revista en línea], 42 (2), 133-143. Consultado el 18 de septiembre de 2011 en: http://prontus.uv.cl/pubacademica/pubprofesores/m/pubmartinezangela/site/artic/20090311/a_socfile/desarrollo_de__la_epidemiologia.pdf
- Lou, J. C.; Lee, W. L.; Han, J. Y. (2007). Influence of alkalinity, hardness and dissolved solids on drinking water taste: A case study of consumer satisfaction. *Journal of Environmental Management* 82 1–12
- Mason, B. (1960). *Principios de Geoquímica*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Miller, J.N. y Miller, J.C. (2002). *Estadística y Quimiometría para química analítica*. (4ta ed.). Madrid: Prentice Hall.
- Ministerio del Ambiente. (2006). Recursos hídricos de Venezuela (1era ed.). Caracas: Fundambiente.
- Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables. (1997). EL AGUA Plantas de tratamiento Venezuela (tomo 3 ed. Especial). Caracas: Rivas.
- Ministerio del Poder Popular para la Salud. (2009). [Página web en línea]. disponible en: <http://http://www.mpps.gob.ve/>
- Montero, R. (1996). *Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas asociadas a zonas de explotación de hidrocarburos*. Trabajo de ascenso no publicado, Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad Central de Venezuela, Caracas.



- Najul, M. y Blanco, H., (2003). *Manejo y protección de fuentes de abastecimiento para agua potable*. Material de apoyo, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Caracas.
- National Institute of Public Health. (2003). [Página web en línea]. Disponible en: <http://midasspring.com/typed%20documents/HealthSignificance.pdf>
- Oliveros, O. (1970). *Resultado de la inspección geológica efectuada al área del aliviadero del embalse Los Quediches*. Barquisimeto: FUDECO.
- Ramírez, A. (1980). *Contaminación Geoquímica: aguas y sedimentos*. Trabajo de ascenso no publicado, Facultad de Ciencias Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Ramírez, A. (1984). *Hidrogeoquímica del río Tuy*. Trabajo de ascenso no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Reimann, C.; Filzmoser, P.; Garrett, R. (2005). Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment* 346, 1– 16.
- Rodier, J. (1981). *Análisis de las aguas* Barcelona: Ediciones Omega.
- Rubenowitz, E.; Axelsson, G.; Rylander, R. (1996). Magnesium in Drinking Water and Death from Acute Myocardial Infarction. *American Journal of Epidemiology*, 143 (5), 456-462.
- Sawyer, C. y McCarty, P. (1978). *Chemistry for Environmental Engineering* (3rd ed.). Nueva York, EEUU: McGraw Hill.
- Selinus, O. (2004). Geología Médica: una especialidad emergente. *Terrae*, 1(1) A1-A8.
- Selinus, O.; Alloway B.; Centeno, J. (2005). *Essentials of Medical Geology: Impacts of the Natural Environment on Public Health*. Elsevier Academic Press.



- Selinus, O. (2007). Medical Geology: An Opportunity for the Future. *AMBIO A Journal of de Human Environment*, 36 (1), 114-116.
- Skoog, D.; Holler, F. y Nieman T. (2001). *Principios de análisis instrumental* (5ta ed.). Madrid: McGraw Hill.
- Stumm, W. y Morgan, J.J. (1996). *Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd ed.). New York : John Wiley & Sons.
- Swain, J.; McCarron, P.; Hamilton, E.; Sacks, F.; Appel, L. (2008). Characteristics of the Diet Patterns Tested in the Optimal Macronutrient Intake Trial to Prevent Heart Disease (OmniHeart): Options for a Heart-Healthy Diet. *Journal of the AMERICAN DIETETIC ASSOCIATION*, 108 257-265.
- Tosiani, T.; Castet, S.; Viers, J. (2007). Algunas relaciones durante la mezcla de aguas de grandes ríos. VIII Congreso Venezolano de Química. Universidad Central de Venezuela, 24-28/06/2007.
- Tosiani, T. (2008). Patologías asociadas a la distribución natural de Se, Ca y Mg sobre la corteza terrestre. *INTERCIENCIA*, 33 (3), 171-178.
- Velásquez, L. (2000). *Hidrogeoquímica de los ríos que drenan los llanos Venezolanos*. Tesis de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- WHO Guidelines for drinking-water quality. (2006). [Página web en línea]. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/guidelines/en/index.html
- WHO, (2009). *Calcium and Magnesium in Drinking-Water: public health significance*. Geneva: World Health Organization



WHO Guidelines for drinking-water quality. (2011). [Página web en línea]. Disponible en:
http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/guidelines/en/index.html

Yang, C. (1998). Calcium and Magnesium in drinking water and risk of death from cerebrovascular disease. *American Heart Association, Inc.*, 411-414.

Yang, C.; Tsai, S.; Lai, T. (1999). Rectal Cancer Mortality and Total Hardness Levels in Taiwan's Drinking Water. *Environmental Research*, 80 311-316.

Yang, C.; *et al.* (2006). Calcium and Magnesium in drinking water and risk of death from acute myocardial infarction in Taiwan. *Environmental Research*, 101 407-411.

Yusuf, S.; *et al.* (2004). Effect of potentially modifiable risk factors associated with myocardial infarction in 52 countries (the INTERHEART study): case-control study. *The Lancet*, 364 (9438), 937 – 952.



10. APENDICES

APENDICE A: Especificaciones de las plantas de tratamiento de la zona de estudio por estado

Tabla 11: Plantas potabilizadoras de la región Capital (M.A.R.N.R, 1997).

Empresa operadora: HIDROCAPITAL				
Nombre	Fuentes de abastecimiento	Ubicación	Población abastecida	
CIUDAD DE CARACAS	Embalses Lagartijo, Taguacita, Taguaza, Quebrada Seca y la Perez; Río Tuy	Al final de la Av. principal de macaracuay, en la ciudad de Caracas. coordenadas geográficas: Latitud 10° 27' 29.11" N Longitud 66° 48' 35.45" W	Municipios: Baruta, el Hatillo, Sucre y Libertador	DISTRITO CAPITAL
LA MARIPOSA	Embalse la Mariposa, la cual recibe agua proveniente del sistema Tuy I	Carretera Valles del Tuy, sector las Mayas Km3 coordenadas geográficas: Latitud 10° 25' 4.54" N Longitud 66° 55' 58.73" W	El Cementerio, Caricuao, el Valle, Coche, El Paraíso, Valle Abajo, Los Chaguaramos, Sabana Grande, Bello Monte, parte de la Candelaria, Parte de la Florida, Fuerte Tiuna, Las Mayas, Las Acacias, parte del Edo. Miranda.	
LA PEREZA	Embalse La Perez	Sector Mariche, vía al embalse	Mariche y Turumo	
MACARAO	Sistema Tuy III	Sector Macarao, carretera Negra, vía comando de la guardia nacional, Caracas	Parroquia Macarao y parte de Caricuao	
CAUJARITO	Embalse Camatagua, Lagartijo y río Tuy	Carretera Nacional La Raiza, Vía Charallave, Santa Teresa del Tuy, Sector Caujarito a 7km del distribuidor la peñita, Edo. Miranda.	Región Capital (45%) y municipios de los Valles del Tuy (20%): Cristóbal, Independencia y Paz Castillo del Edo. Miranda	ESTADO MIRANDA
OCUMARITO	Embalse Ocumarito	Vía Colonia Mendoza, parcela #2 Ocumare del Tuy, Municipio Tomás Lander Edo. Miranda	Municipios: Tomás Lander, Urdaneta, Cristobal Rojas	
TM-I	Embalse Lagartijo	Carretera Nacional Yare-Santa Teresa, San Francisco de Yare, frente a la estación bombeo 21 Edo. Miranda	Comunidades del Sistema Losada- Ocumarito, específicamente los Municipios: Simón Bolívar y parte del Independencia	
TAGUAZA	Embalse Taguaza	Carretera nacional Caucagua Araguaita, vía sector el Latón km2, Edo. Miranda	Municipios: Acevedo Plaza y Zamora	
EL GUAPO	Embalse el Guapo	Carretera vía oriente, a 6km de la población El Guapo, municipio Pedro Gual, Edo. Miranda coordenadas geográficas: Latitud 10° 09' 00" N Longitud 65° 58' 00" W	Municipios: Acevedo, Andres Bello, Brión, Buroz, Paéz y Pedro Gual, el resto está en la carretera Troncal 9 Tapipá-Panaquire, El Clavo, El Guapo, Cúpira, Boca de Uchire	
LA PEÑITA	Sistema Tuy I	Carretera Nacional La Raiza, vía Santa Teresa del Tuy, Sector La Peñita, Edo. Miranda	Sectores (Zona Industrial Alvarenga, Urb. Arichuna, Barrio José Félix Ribas) ubicados en el municipio Cristobal Rojas	
LOS TEQUES	Embalse Agua Fría	Carretera vía al Jarillo, Sector Laguneta	Red alta sistema panamericano: Lagunetica, El Trigo, La Estrella, Alberto Ravert, Las Dalias, El Tigrito, Vista Hermosa, Monte Verde, Sta. Eulalia, Rómulo, Palo Alto, Maturaca, El Pueblito.	
LAS MERCEDES	Río Cúpira	Estado Miranda, Municipio Pedro Gual, Cúpira, sector las Mercedes	Cúpira, las Mercedes	
SOTILLO	Mezcla entre la planta de tratamiento el guapo y los pozos madre vieja 1 y 5	Municipio Brión, Sector las colonias, calle principal	Higuerote	



Continuación de la **Tabla 11:** Plantas potabilizadoras de la región Capital. Modificado del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997)

Empresa operadora: HIDROCAPITAL				ESTADO VARGAS
Nombre	Fuentes de abastecimiento	Ubicación	Población abastecida	
PICTURE	Ríos: Chichiriviche, Limón y Maya	Carretera de la costa, vía las salinas, al oeste de la comunidad el Picture, parroquia Carayaca, Estado Vargas	Las Salinas, la Esperanza, Catia La Mar, Maiquetía y la Guaira	
NAIGUATA	Ríos Naiguatá	NAIGUATÁ	Naiguatá, Litoral Central (parcial)	
CARAYACA	Embalse Petaquire	Sector el pardillo, parroquia Carayaca	Pueblo de Carayaca, Tarmas, Tirima y Manzanillo	

Tabla 12: Plantas potabilizadoras del Estado Mérida. Modificado del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997)

Empresa operadora: AGUAS DE MERIDA				ESTADO MERIDA
Nombre	Fuentes de abastecimiento	Ubicación	Población abastecida	
LUIS ENRIQUE BOURGOIN	Río Mucujun	Sector el Vallecito. Parroquia Gonzalo Picón Febres. Municipio Libertador	80% de la ciudad de Mérida	
EDUARDO JAUREGUI	Río Albarregas	calle 5 Tatuy Hoyada de Milla Municipio Libertador	20% de la ciudad de Mérida	
MUCUJEPE	Río Cacique y Río Caña Brava	Mucujepe sector mesa alta el Vigía Edo. Mérida	Municipio Alberto Adriani El Vigía	
LUIS MORA	Río Tucaní	Sector el Vijao, vía el Charal, Municipio Caracciolo Parra y Olmedo, Tucaní Edo. Mérida	Municipio Caraociolo Parra y Olmedo, Tucaní Edo Mérida	
Homero Izarra Avendaño	Quebrada las Gonzáles	San Juan, El Estanquillo, Sector Piedras Sucre	Municipio Sucre	
BERNARDO LUZARDO	Río Capaz	Sector la Pueblita. Vía la Uva, Municipio Andrés Bello, La Azulita, Edo. Mérida	Municipio Andrés Bello, La Azulita	
Empresa operadora: AGUAS DE EJIDO				
Nombre	Fuentes de abastecimiento	Ubicación	Población abastecida	
Eleazar López Contreras	Quebrada Montalbán y Portuguesa	Sector el Manzano, vía Don Duque, Ejido, Edo. Mérida	Municipio Campo Elías, 70% de la población del sector el cobre	



Tabla 13: Plantas potabilizadoras del Estado Lara. Modificado del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997)

Empresa operadora: HIDROLARA				ESTADO LARA
Nombre	Fuentes de abastecimiento	Ubicación	Población abastecida	
CIUDAD DE BARQUISIMETO	Embalse Dos Cerritos	Autopista vía Quibor sector los guayabos frente al antiguo frigorífico de Quibor	Municipio Jiménez localidad Quibor	
EL MANZANO	Pozo (campo de pozo Macuto)	Km. 8 vía Río Claro entrando por el puente Macuto sector el Manzano	Municipio Iribarren localidad Barquisimeto	
CARORA	Embalse Los Quediches	Carretera del distribuidor centro occidental sector Sta. Rita	Municipio Torres localidad Carora	
EL TOCUYO	Embalse: Dos Cerritos	El Tocuyo	Municipio Morán localidad el Tocuyo	
SABANETA	Embalse Atarigua	Autopista Lara-Zulia km. 90 sector Sabaneta frente a la estación de servicio Sabaneta	Municipio Torres localidad Sabaneta	
SANARE	Quebradas Monte Carmelo y Mortero	Sanare vía el Blanquito	Municipio Andrés Eloy Blanco localidad Sanare	

Tabla 14: Plantas potabilizadoras del Estado Carabobo. Modificado del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997)

Empresa operadora: HIDROCENTRO				ESTADO CARABOBO
Nombre	Fuentes de abastecimiento	Ubicación	Población abastecida	
ALEJO ZULOAGA	Embalses Pao, Cachinche y Guataparó	Sector San Luis, Valencia Estado Carabobo	Municipios: Valencia, Libertador, Los Guayos, San Diego, Naguanagua	
LUCIO BALDO SOULES	Embalse: Pao- Las Balsas	Sector Noguera, Carlos Arvelo Estado Carabobo	Municipios Carlos Arvelo, Guacara, Diego Ibarra, San Joaquín, Girardot de Valencia	



Tabla 15: Plantas potabilizadoras del Estado Zulia. Modificado del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997)

Empresa operadora: HIDROLAGO				ESTADO ZULIA
Nombre	Fuentes de abastecimiento	Ubicación	Población abastecida	
ALONSO DE OJEDA "C"	Embalse Tulé	Maracaibo Estado Zulia	Municipios Maracaibo, San Francisco, Jesús E. Losada	
CASIGUA	Río Tarra	Municipio Jesús María Semprum	Municipio Jesús María Semprum, Casigua el Cubo	

Tabla 16: Plantas potabilizadoras del Estado Apure. Modificado del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997)

Empresa operadora: HIDROLLANOS				ESTADO APURE
Nombre	Fuentes de abastecimiento	Ubicación	Población abastecida	
SAN FERNANDO CENTRO	Río Apure	Calle principal la defensa, edificio Hidrollanos. San Fernando, Municipio San Fernando	Casco central municipio San Fernando y zonas noreste del municipio Biruaca	
El Recreo	Pozo Profundo	Calle principal el recreo, municipio San fernando	Urbanización el recreo y zonas adyacentes	
Pedro Camejo	Pozo Profundo	Calle principal urbanización Luis Herrera, municipio San Fernando	Urbanización Luis Herrera y zonas adyacentes	
La Guamita	Pozo Profundo	Calle Principal la Guamita, municipio San Fernando	Urbanización la Guamita I,II y zonas adyacentes	
Llano Alto	Pozo Profundo	Calle principal llano alto, municipio Biruaca	Urbanización Llano alto	
Santa Rufina	Pozo Profundo	calle principal urbanización Santa Rufina, municipio Biruaca	Urbanización Santa Rufina y zonas adyacentes	



Tabla 17: Plantas potabilizadoras del Estado Falcón. Modificado del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997)

Empresa operadora: HIDROFALCON				ESTADO FALCON
Nombre	Fuentes de abastecimiento	Ubicación	Población abastecida	
EL ISIRO	Embalse El Isiro	Municipio Guzmán Guillermo	Municipios Miranda, Falcón y Colina	
Luis Martin Martínez Barrancas	Embalse Las Barrancas	Las dos bocas Municipio Colina	Municipios Carirubana, Falcón, Zamora, Colina	

Tabla 18: Plantas potabilizadoras del Estado Yaracuy, Modificado del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (1997)

Empresa operadora: AGUAS DE YARACUY				ESTADO YARACUY
Nombre	Fuentes de abastecimiento	Ubicación	Población abastecida	
SAN FELIPE	Río Yurubí	Parque Nacional Leonor Bernabo San Felipe	San Felipe, parte alta y baja	
CUMARIPA	Embalse Cumaripa	Comunidad Cumaripa, Municipio Bruzual	Arístides Bastidas, parte baja Sucre, Cocorote, Trinidad, Independencia, San Felipe	
COCOROTE	Río Cocorote	Urbanización las Acequias sector la creadora, Cocorote	Cocorote	
YARITAGUA	Manantiales: Almorzadero y Mariquita	final sector Cañaveral, Yaritagua	Yaritagua, Piedra, Salto	
AROA	Rio Aroa	Sector Casa de Teja, Parque Nacional Minas de Aroa	Aroa	
CAICARA	Rio Guama	Sector Caicara Municipio Sucre	Guama y parte baja de San Pablo	



APENDICE B: Total de muestras recibidas para este proyecto por las diferentes plantas de tratamiento de la zona en estudio y otras especificaciones

Tabla 19: Total de muestras recibidas por las diferentes plantas de tratamiento de la zona en estudio

Estado y Empresa Operadora		Plantas de tratamiento	Año en que comenzó a funcionar la planta	Número de habitantes que se sirven del agua	Volumen de agua tratada (Lt/s)	Muestras enviadas
Mérida	Aguas de Ejido	Eleazar López Contreras (1)	1994	94.000	245	2
	Aguas de Mérida	Mucujepe (2)	1998	91.332	_____	12
		Eduardo Jáuregui (3)	1948	35.442	_____	
		Luis Mora de Tucaní (4)	2004	7000	40	
		Enrique Bourgoin (5)	1973	141.771	_____	
		Bernardo Luzardo (6)	2003	4000	20	
		Homero Izarra Avendaño (7)	2000	21040	120	
Vargas	HIDROCAPITAL	Naiguatá (8)	1958	39.850	480	32
Dto. Capital		Picure (9)	1978-79	106.684	1.500	
		Carayaca (10)	1963	28.201	25	
		La Pereza (11)	_____	_____	_____	
		Macarao (16)	1958	_____	120	
Miranda		Ciudad de Caracas La Guairita (22)	1967	2.488.320	250	
		La Mariposa (23)	1954	774.361	4.900	
		Ocumarito (12)	1980	213.236	1.500	
		TMI (13)	1972	162.427	290	
		Caujarito (14)	1980	1.444.931	15.000	
		La Peñita (15)	1983	1.500	_____	
		Los Teques (17)	_____	50.000	_____	
		Sotillo 18)	_____	_____	_____	
		El Guapo 19)	1981	33.539	1.200	
Taguaza (21)		1987	500.000	1.200		
Las Mercedes(20)	_____	_____	_____			



Continuación de la **Tabla 19**: Total de muestras recibidas por las diferentes plantas de tratamiento de la zona en estudio

Estado y Empresa Operadora	Plantas de tratamiento	Año en que comenzó a funcionar la planta	Número de habitantes que se sirven del agua	Volumen de agua tratada (Lt/s)	Muestras enviadas
Lara HIDROLARA	Carora (24)	1969	107.000	200	12
	El Tocuyo (25)	1970	60.000	250	
	Ciudad Barquisimeto (26)	1968	1.000.000	3.600	
	El Manzano (27)	1950	600.000	600	
	Sabaneta (28)	2000	50.000	180	
	Sanare (29)	1998	47.272	80	
Falcón HIDROFALCON	El Isiro (30)	1963	503.976	_____	4
	Luis Martin Martines Barrancas (31)	1985	400.993	_____	
Apure HIDROLLANOS	San Fernando Centro (32)	_____	90.344	_____	12
	El Recreo (33)	_____	12.078		
	Pedro Camejo (34)	_____	7.765		
	La Guaimita (35)	_____	4.753		
	Llano Alto (36)	_____	2.750		
	Sta. Rufina (37)	_____	25.627		
Carabobo HIDROCENTRO	Lucio Baldo Soules (38)	_____	956.025	18.403.200	4
	Alejo Zuloaga (39)	_____	1.446.859	15.552.000	
Zulia HIDROLAGO	Casigua (40)	1992	28.000	_____	4
	Alonso de Ojeda (41)	_____	1.914.373		
Yaracuy AGUAS DE YARACUY	Aroa (42)	_____	11.457	70	12
	Caicara (43)	_____	15.812	100	
	Cumaripa (44)	_____	58.951	540	
	Cocorote (45)	1985	40.000	80	
	San Felipe (46)	1970	73.031	240	
	Yaritagua (47)	_____	81.518	240	
Total de plantas de tratamiento		47	Total de muestras recibidas 94		

APENDICE C: Ubicación de las plantas de tratamiento por estado. Modificado de HIDROVEN, Direcciones Estadales Ambientales y Dirección General de Equipamiento Ambiental del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, elaborado por coordinación Sala Situacional DGEA. Versión preliminar sujeta a modificaciones Junio 2008

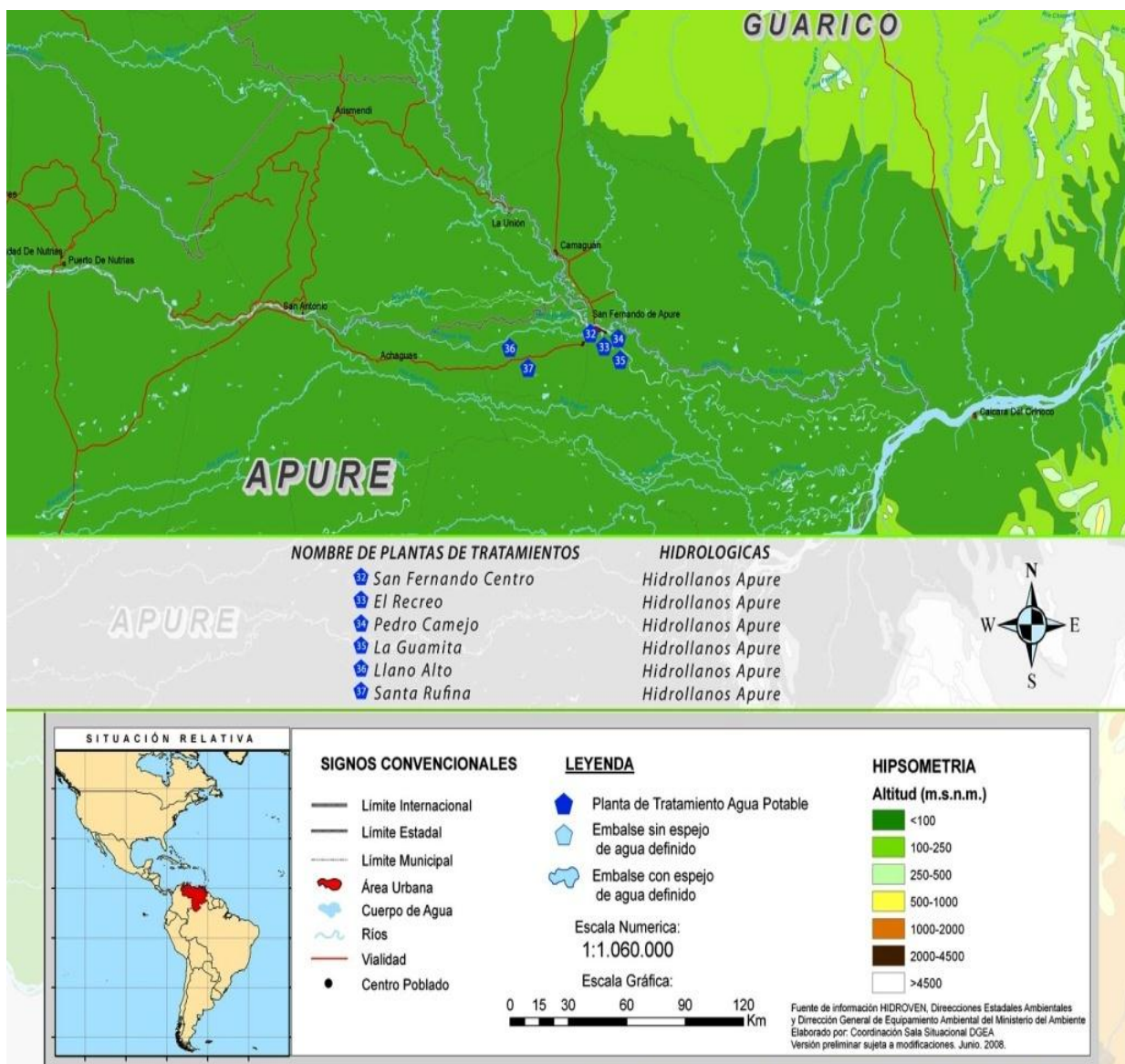


Figura 27: Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estado Apure.

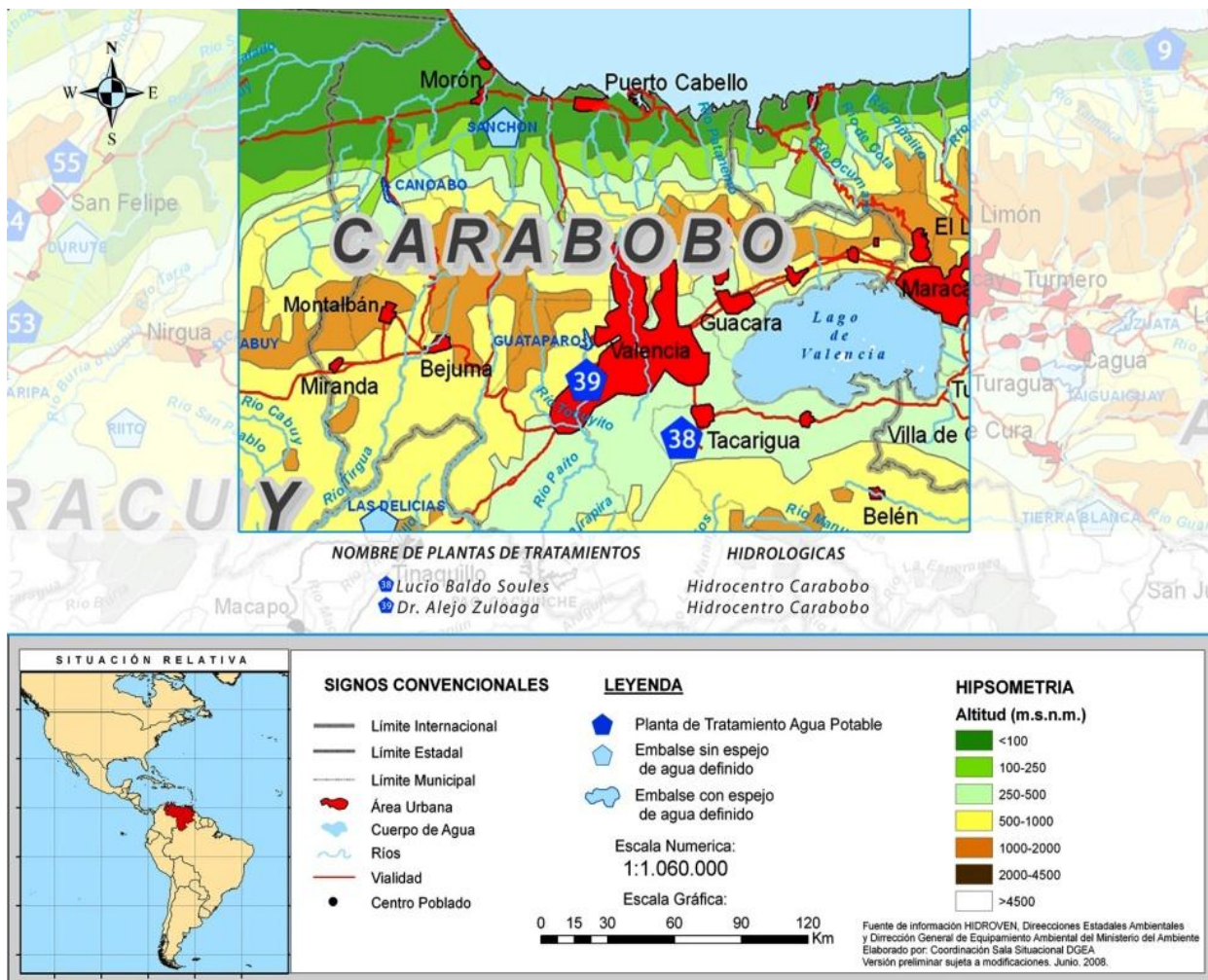


Figura 28: Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estado Carabobo.

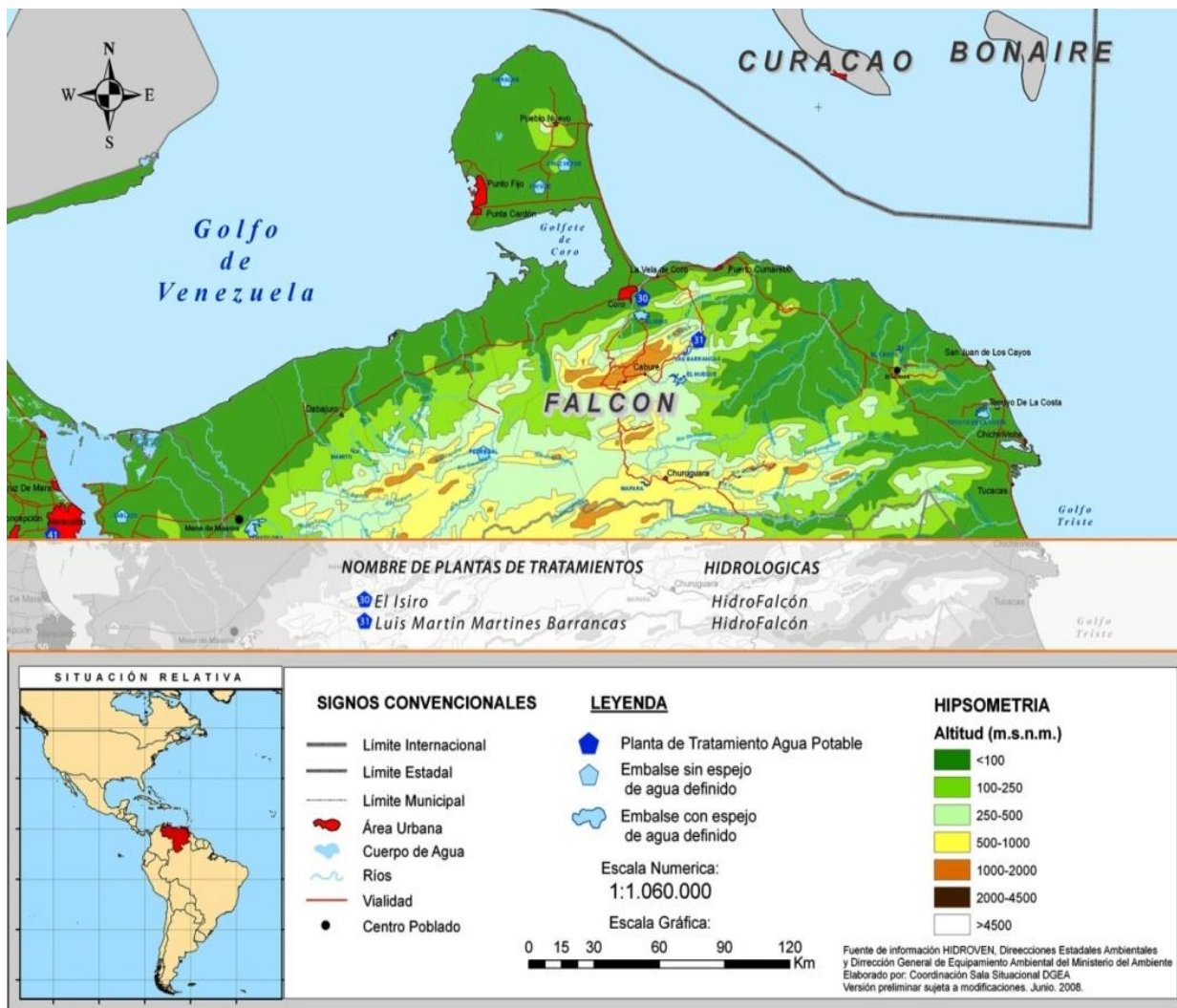


Figura 29: Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estado Falcón.

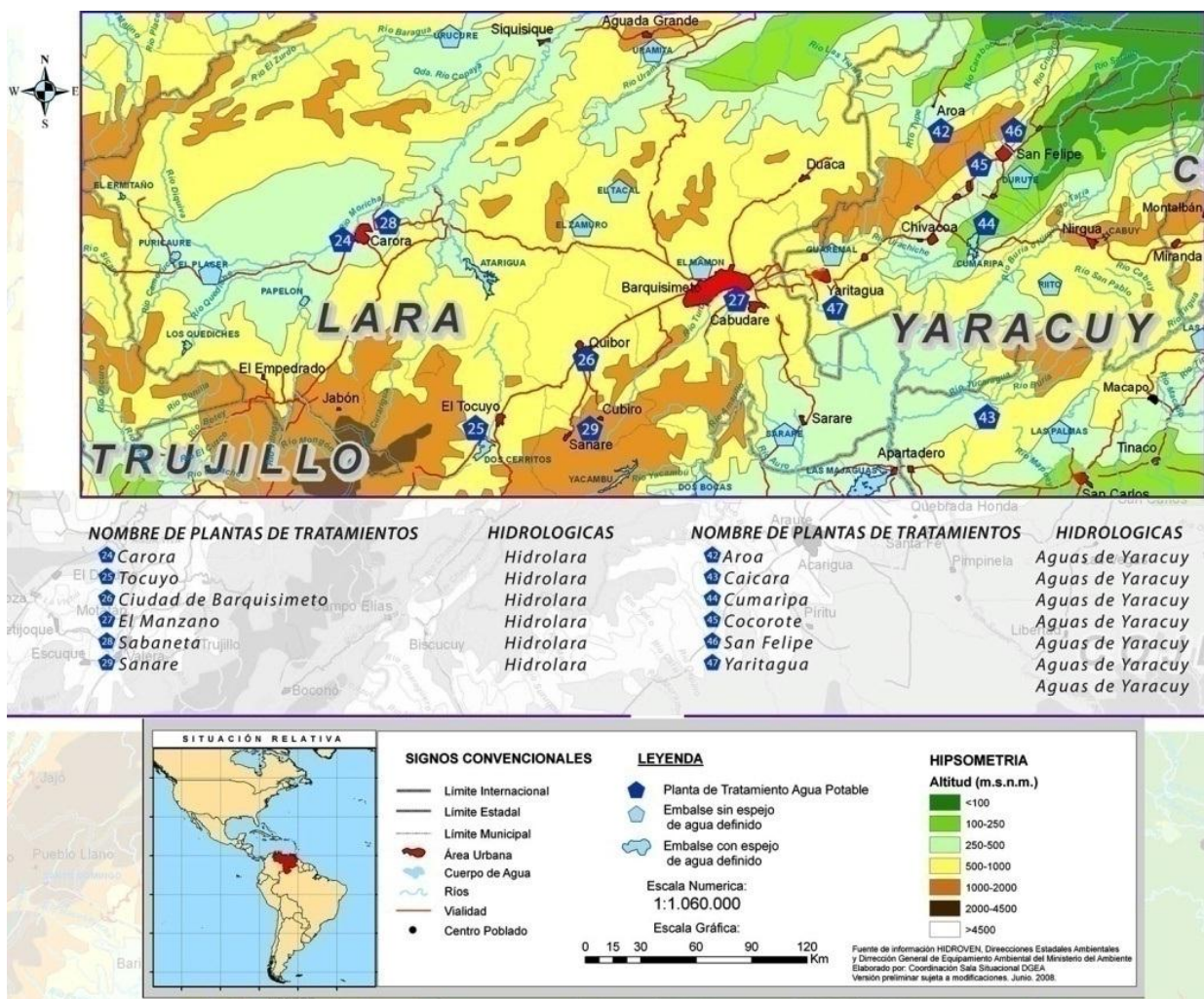


Figura 30: Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estados Lara y Yaracuy.



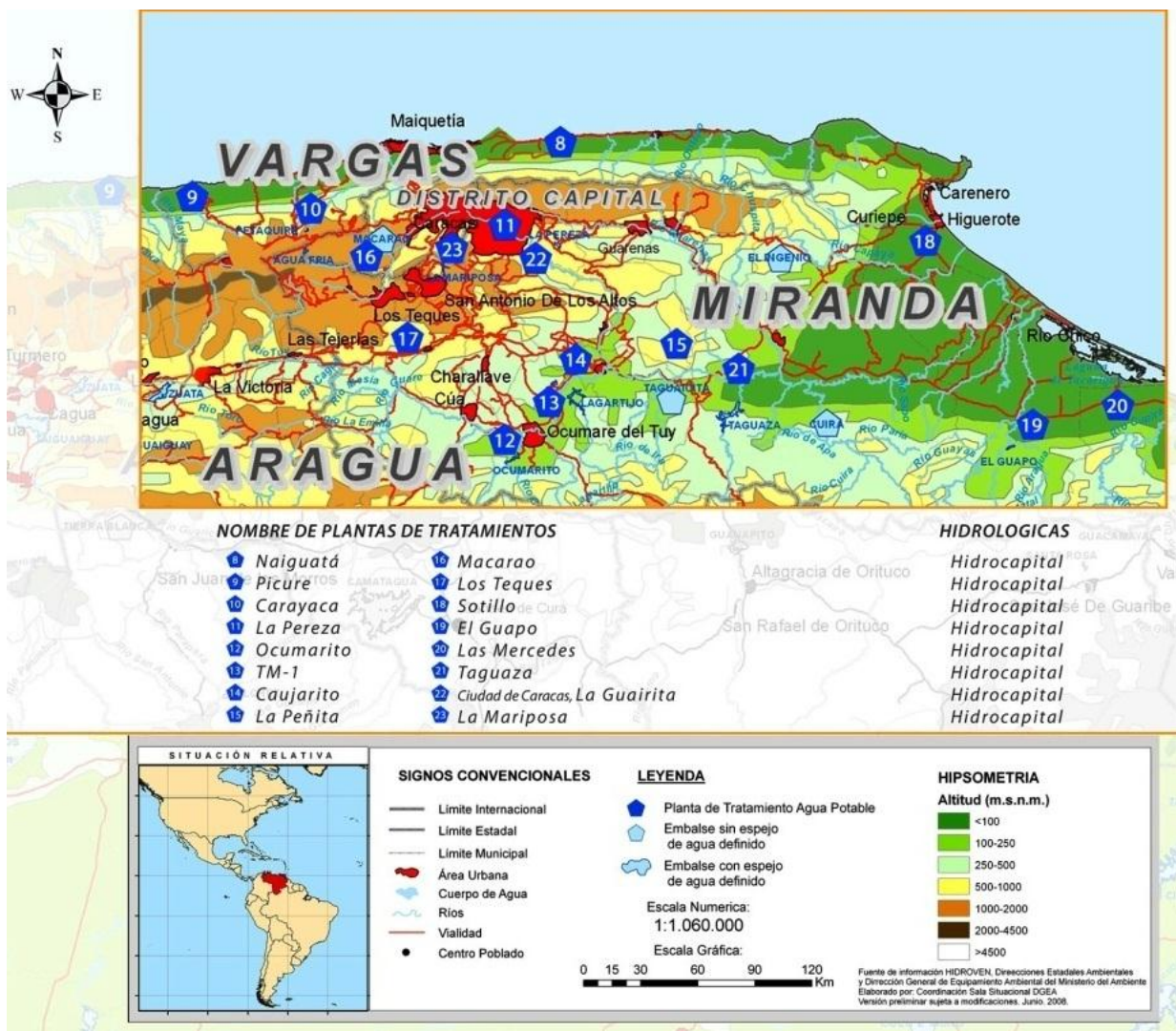


Figura 32: Plantas de tratamiento de agua potable de la zona en estudio, estados Miranda, Vargas y Distrito Capital.

124

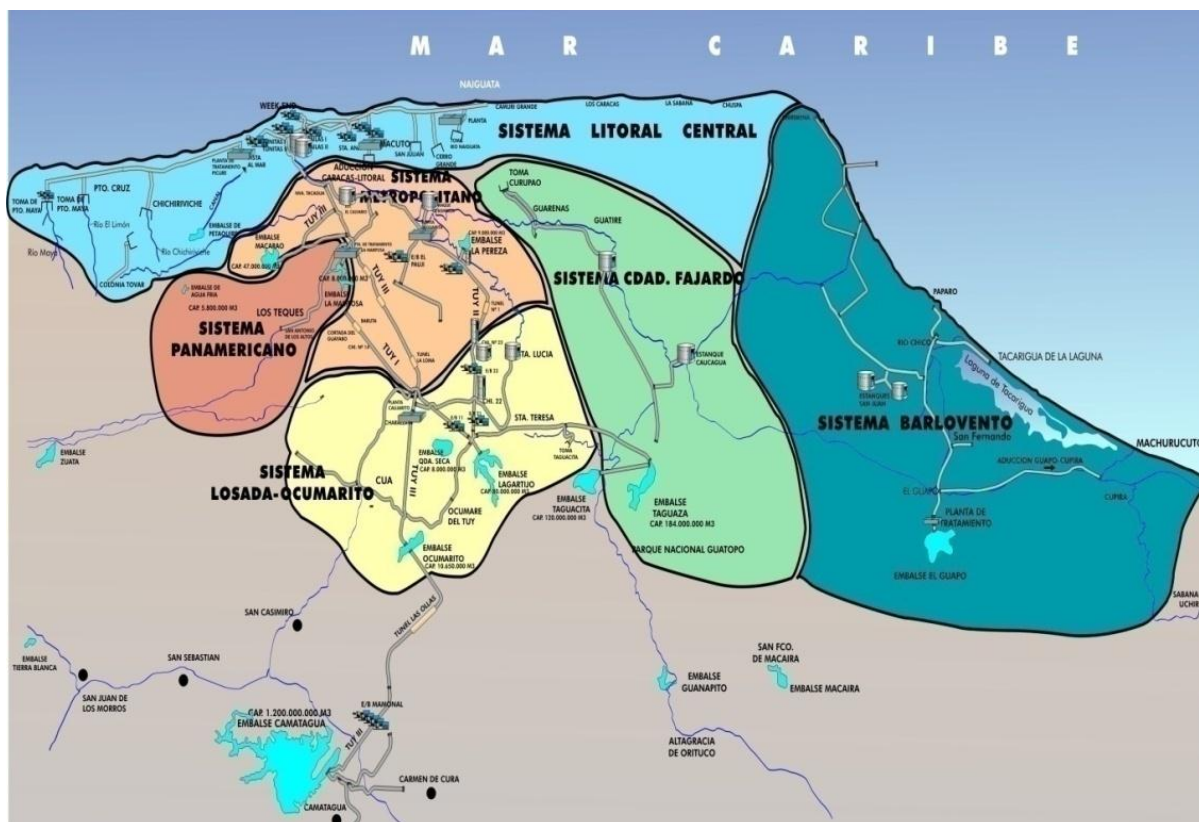


Figura 34: Área de influencia de Hidrocapital. Tomado de mapas y embalses <http://www.hidroven.gov.ve>

APENDICE E: Especificaciones del instrumental utilizado



Figura 35: Espectrómetro de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado

Tabla 20: Condiciones del espectrómetro de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado del instituto de Ciencias de la Tierra (ICT), Departamento de Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela

Modelo	HORIBA Jovin Yvon, modelo ULTIMA 2
Montaje Óptico	Czerny Turner
Gas del Plasma	Argón
Potencia	1000 w
Flujo de Gas	13L/min
Nebulizador	0,8L/min
Tipo de Nebulizador	Vidrio concéntrico
Altura de lectura de visualización	3 mm
Onda focal	0,64 m
Caudal aproximado	(1,1 a 1,4) mL/min
Flujo de muestra	1,2 mL/min

Tabla 21: Longitud de onda e intervalo de concentración de patrones de las especies químicas analizadas

Especie Química	Longitud de onda (nm)	Intervalo de concentración de patrones
Ca ²⁺	393,366	(1-20)mg/L
Mg ²⁺	285,213	(0,05-1)mg/L
Na ⁺	589,592	(0,05-1)mg/L
K ⁺	766,49	(0,1-2)mg/L

APENDICE F: Curvas de Calibración

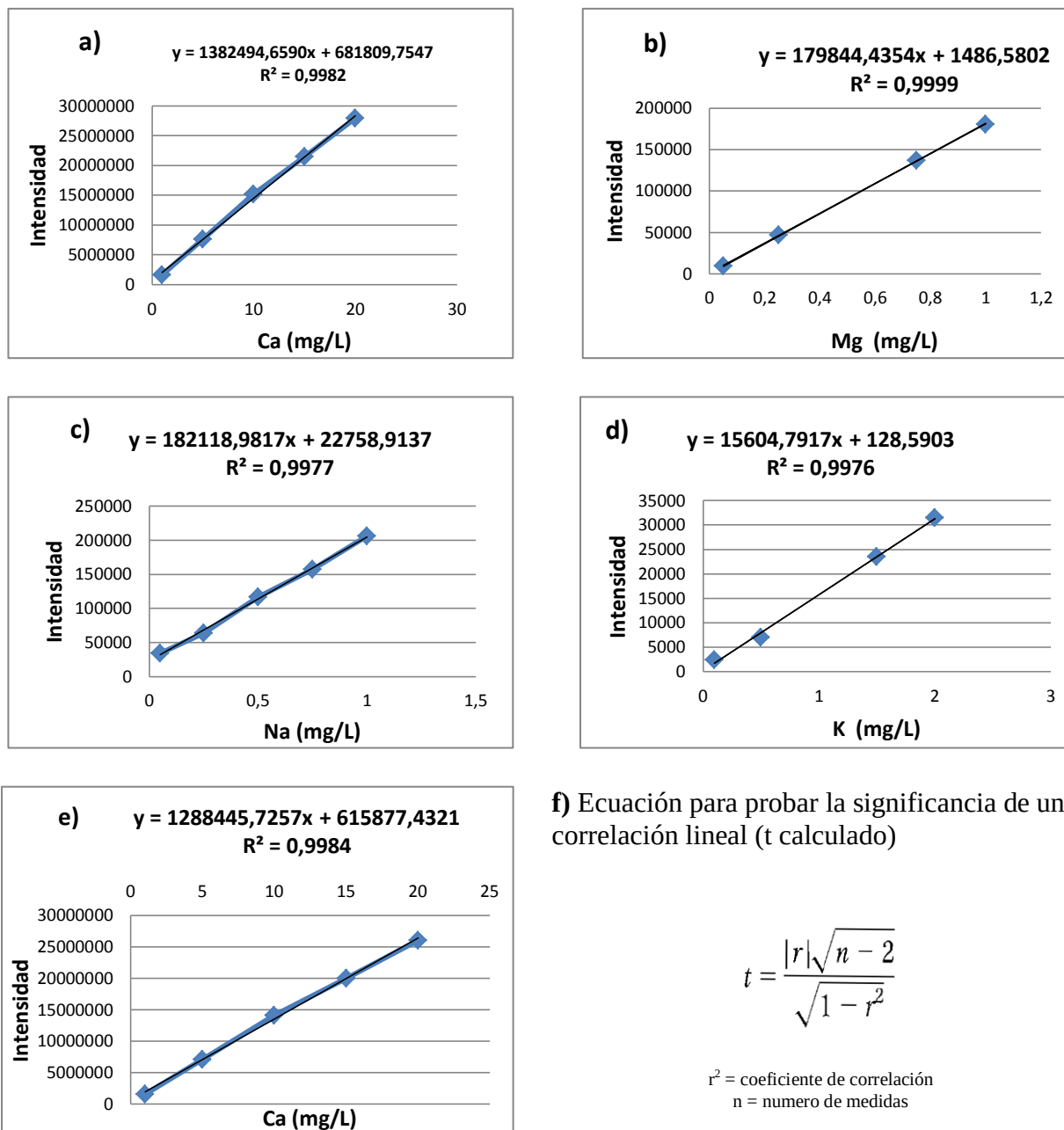


Figura 36: Curvas de calibración de a) Ca, b) Mg c) Na d) K y e) Ca por ICP-OES y f) ecuación de significancia.

Tabla 22: Resultados de t calculado por elemento para probar la significancia de una correlación lineal y comparar con t critico ($t(95\%,3)=3,18$ y $t(95\%,2)=4,30$)

Elemento	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺
t(95%) calculado	40,79	141,41	36,07	28,83	43,27



APENDICE G: Límites de detección (LOD) y cuantificación (LOQ)

Para calcular los límites de detección (LOD) y de cuantificación (LOQ), se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Límite de detección

$$\text{LOD} = 3 * \text{Sb} * m^{-1}$$

Límite de cuantificación

$$\text{LOQ} = 10 * \text{Sb} * m^{-1}$$

Siendo m, la pendiente de la curva de calibración y Sb, la desviación estándar absoluta del blanco para los elementos calcio, magnesio, sodio y potasio, medido 6 veces.

Tabla 23: Límites de detección y de cuantificación en muestra *

Elemento	LOD	LOQ
Ca ²⁺	0,0005	0,002
Mg ²⁺	0,0001	0,0005
Na ⁺	0,001	0,003
K ⁺	0,02	0,05

* µg/L

APENDICE H: Precisión de los análisis

a)

Muestra	Ca	K	Mg	Na
FaHFA30b	53,10	2,02	19,16	27,80
FaHFA30bR1	53,67	1,78	19,73	28,68
FaHFA30bR2	52,12	1,80	19,13	28,28
Promedio	52,96	1,86	19,34	28,25
Desviación	0,78	0,13	0,34	0,44
%CV	1,48	7,16	1,76	1,56

b)

Muestra	Ca	K	Mg	Na
FaHFA31a	17,77	1,21	16,49	7,85
FaHFA31aR1	17,75	1,46	16,64	7,95
FaHFA31aR2	17,87	1,35	16,98	7,89
Promedio	32,07	1,40	17,22	9,62
Desviación	0,88	0,20	0,27	0,19
%CV	2,74	14,32	1,55	1,96

c)

Muestra	Ca	K	Mg	Na
AHLL37a	17,56	0,97	25,86	20,91
AHLL37aR1	18,06	1,29	26,18	21,53
AHLL37aR2	17,32	1,02	26,05	21,08
Promedio	17,65	1,09	26,03	21,18
Desviación	0,38	0,17	0,16	0,32
%CV	2,16	15,81	0,62	1,51

d)

Muestra	Ca	K	Mg	Na
CaHCE39b	25,63	8,27	15,32	36,06
CaHCE39bR1	24,79	7,51	15,19	35,58
CaHCE39bR2	25,64	7,36	15,23	35,98
Promedio	25,35	7,71	15,24	35,87
Desviación	0,49	0,49	0,07	0,26
%CV	1,92	6,38	0,43	0,73

e)

Muestra	Ca	K	Mg	Na
YaADY45a	88,48	2,62	22,46	7,07
YaADY45aR1	87,42	2,56	22,11	7,17
YaADY45aR2	86,74	2,38	22,03	7,05
Promedio	87,54	2,52	22,20	7,10
Desviación	0,88	0,13	0,23	0,06
%CV	1,00	4,99	1,04	0,90

Figura 37. Parámetros de calidad calculados en replicas A (repetibilidad) de las muestras a) FaHFA30b, b) FaHFA31a, c) AHLL37a, d) CaHCE39b, e) YaADY45a para determinar la precisión del análisis

a)					b)				
Muestra	Ca	K	Mg	Na	Muestra	Ca	K	Mg	Na
MiHCA13a	17,77	1,21	16,49	7,85	MiHCA13b	28,01	1,25	16,60	9,09
MiHCA13aR1	17,75	1,46	16,64	7,95	MiHCA13bR1	29,86	1,38	16,88	9,29
MiHCA13aR2	17,87	1,35	16,98	7,89	MiHCA13bR2	28,39	1,23	16,48	8,02
MiHCA13aR3	18,23	1,39	16,80	8,07	MiHCA13bR3	28,55	1,08	16,93	7,85
MiHCA13aR4	17,60	1,38	16,61	8,62	MiHCA13bR4	28,03	1,26	16,73	7,86
Promedio	17,84	1,36	16,70	8,08	Promedio	28,57	1,24	16,72	8,42
Desviación	0,23	0,09	0,19	0,32	Desviación	0,76	0,11	0,19	0,71
%CV	1,31	6,63	1,15	3,90	%CV	2,66	8,61	1,13	8,40

c)

Prueba t para medias de dos muestras (MiHCA13a y MiHCA13b) emparejadas, y el t crítico es:

$t_{(95\%, 4)} = 2,7764451$

	Ca	K	Mg	Na
P(T<=t) calculado	0,0000068	0,0995939	0,8990571	0,4477923

Figura 38: Parámetros de calidad calculados en replicas B (reproducibilidad) de las muestras a) MiHCA13a, b) MiHCA13b para determinar la precisión del análisis y c) resultados de la prueba t de la muestra MiHCA13 en aguas crudas y tratadas por elemento

Tabla 24: Parámetros de calidad calculados en replicas A y B de las muestras correspondientes para determinar la precisión del análisis

Parámetro	Fórmula empleada
Promedio o media	$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$
Desviación estándar	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$
Porcentaje de coeficiente de variación	$CV = \frac{s}{\bar{X}} (100\%)$



APENDICE I: Sesgo

Tabla 25: Test de detección del sesgo aplicado a la solución patrón STD_4 para $t(95\%, 8) = 2,31$

Muestra	Concentración (mg/L)			
	Ca	K	Mg	Na
STD_41	15,06	1,47	0,76	0,88
STD_42	14,90	1,48	0,77	0,70
STD_43	14,98	1,43	0,77	0,75
STD_44	15,06	1,34	0,75	0,67
STD_45	14,99	1,31	0,76	0,72
STD_46	15,14	1,27	0,75	0,72
STD_47	15,52	1,30	0,76	0,82
STD_48	14,96	1,30	0,77	0,81
STD_49	14,59	1,30	0,77	0,31
Prueba de sesgo				
$\bar{x}$	15,02	1,35	0,76	0,71
μ	15,00	1,50	0,75	0,75
S	0,24	0,08	0,01	0,16
Sesgo	0,02	0,15	0,01	0,04
$\pm ts/\sqrt{N}$	0,19	0,06	0,01	0,13

μ = valor verdadero

S= Desviación estándar

N = número total de muestras

$\bar{x}$ = media

Tabla 26: Ecuaciones empleadas para el test de detección del sesgo

a) Sesgo = $\bar{x} - \mu$
b) $\bar{x} - \mu = \pm \frac{ts}{\sqrt{N}}$



APENDICE J: Concentración de los elementos analizados y dureza calculada

Tabla 27: Concentración de elementos analizados, durezas calculadas, fuentes de abastecimiento y estado que abastece en muestras de agua para el consumo humano de 9 estados y Distrito Capital.

Muestra	Estado que abastece	Fuente de Abastecimiento	Concentraciones (mg/L)				Dureza (ppm CaCO ₃)		
			Ca	Mg	Na	K	Total	cálcica	magnésica
MeADE1a	Mérida	Quebrada	10,72	2,41	2,40	1,47	193,64	120,26	73,38
MeADE1b	Mérida	Quebrada	11,72	2,39	2,85	1,68	226,76	142,46	84,30
MeADM2a	Mérida	Rio	19,72	4,49	4,11	1,57	284,32	205,63	78,68
MeADM2b	Mérida	Rio	20,56	5,45	4,08	1,55	281,49	204,02	77,47
MeADM3a	Mérida	Rio	4,01	3,04	2,36	1,06	171,41	118,33	53,07
MeADM3b	Mérida	Rio	2,34	1,55	1,44	0,54	99,06	71,91	27,16
MeADM4a	Mérida	Rio	3,03	2,48	3,10	1,02	206,20	155,21	51,00
MeADM4b	Mérida	Rio	1,62	2,02	2,84	0,94	188,92	141,95	46,97
MeADM5a	Mérida	Rio	5,65	2,49	2,30	1,16	173,43	115,34	58,09
MeADM5b	Mérida	Rio	4,90	2,45	2,14	1,02	158,22	107,03	51,19
MeADM6a	Mérida	Rio	6,09	1,52	0,77	0,80	78,45	38,53	39,92
MeADM6b	Mérida	Rio	12,80	1,56	0,93	0,60	76,65	46,54	30,11
MeADM7a	Mérida	Quebrada	18,02	1,99	1,58	0,56	106,97	78,98	27,99
MeADM7b	Mérida	Quebrada	15,14	1,84	1,58	0,58	108,08	78,96	29,12
VaHCA8a	Vargas	Rio	11,42	6,84	5,10	2,00	355,36	255,28	100,08
VaHCA8b	Vargas	Rio	14,61	6,94	5,31	1,98	364,87	265,68	99,19
VaHCA9a	Vargas	Rio	32,28	11,03	5,70	1,64	367,25	285,28	81,97
VaHCA9b	Vargas	Rio	36,31	11,21	5,38	1,56	347,24	269,24	78,00
VaHCA10a	Vargas	Embalse	28,07	12,20	6,95	2,30	462,96	347,85	115,11
VaHCA10b	Vargas	Embalse	29,58	12,20	7,81	2,33	507,58	390,84	116,74
DCHCA11a	Distrito C.	Embalse	22,83	17,12	11,50	1,78	664,81	575,74	89,07
DCHCA11b	Distrito C.	Embalse	23,75	17,13	11,30	1,81	656,20	565,49	90,71
MiHCA12a	Miranda	Embalse	27,31	30,04	10,28	1,88	608,54	514,31	94,24
MiHCA12b	Miranda	Embalse	26,85	30,64	11,08	1,65	637,03	554,34	82,69
MiHCA13a	Miranda	Embalse	17,77	16,49	7,85	1,21	453,66	392,95	60,70
MiHCA13b	Miranda	Embalse	28,01	16,60	9,09	1,25	517,23	454,68	62,55
DCHCA14a	Distrito C.	Embalse	24,78	28,08	7,93	2,00	496,85	396,72	100,14
DCHCA14b	Distrito C.	Embalse	27,36	27,94	7,70	1,92	481,57	385,46	96,11
MiHCA15a	Miranda	Embalse	39,78	26,85	21,89	2,51	1221,40	1095,64	125,76
MiHCA15b	Miranda	Embalse	37,54	26,29	21,69	2,20	1195,55	1085,66	109,89
DCHCA16a	Distrito C.	Embalse	36,71	9,47	4,65	0,52	258,66	232,66	26,00
DCHCA16b	Distrito C.	Embalse	37,52	9,85	4,91	0,59	275,03	245,63	29,40
MiHCA17a	Miranda	Embalse	31,21	4,44	1,67	0,60	113,49	83,62	29,88
MiHCA17b	Miranda	Embalse	31,30	4,52	1,67	0,68	117,96	83,71	34,25



Continuación de la **Tabla 27**: Concentración de elementos analizados, durezas calculadas y fuentes de abastecimiento en muestras de agua para el consumo humano de 9 estados y Distrito Capital

Muestra	Estado que abastece	Fuente de Abastecimiento	Concentraciones (mg/L)				Dureza (ppm CaCO ₃)		
			Ca	Mg	Na	K	Total	cálcica	magnésica
MiHCA18a	Miranda	Embalse y pozos	64,50	12,13	10,59	0,98	578,94	529,91	49,03
MiHCA18b	Miranda	Embalse y pozos	64,06	12,36	10,84	0,97	591,25	542,62	48,63
MiHCA19a	Miranda	Embalse	12,36	19,47	10,39	1,08	573,78	519,97	53,82
MiHCA19b	Miranda	Embalse	14,12	20,40	10,57	1,09	583,34	528,92	54,42
MiHCA20a	Miranda	Rio	8,32	15,06	10,62	1,21	591,64	531,26	60,38
MiHCA20b	Miranda	Rio	13,31	15,14	12,12	1,27	670,27	606,64	63,62
MiHCA21a	Miranda	Embalse	12,21	10,86	4,01	0,51	226,20	200,44	25,76
MiHCA21b	Miranda	Embalse	10,54	11,03	4,20	0,74	247,18	210,35	36,83
DCHCA22a	Distrito C.	Embalse	22,59	17,52	11,05	1,16	611,11	553,12	57,99
DCHCA22b	Distrito C.	Embalse	23,65	17,64	10,83	1,60	621,63	541,78	79,85
DCHCA23a	Distrito C.	Embalse	43,86	27,24	21,26	3,00	1213,73	1063,78	149,95
DCHCA23b	Distrito C.	Embalse	42,82	26,70	20,93	2,87	1191,19	1047,37	143,82
LaHLA24a	Lara	Embalse	1,00	1,52	1,00	0,69	84,92	50,20	34,72
LaHLA24b	Lara	Embalse	1,17	1,63	1,00	0,74	87,14	50,02	37,13
LaHLA25a	Lara	Embalse	39,30	11,74	3,17	2,30	274,12	158,79	115,33
LaHLA25b	Lara	Embalse	41,01	10,46	2,83	3,20	301,66	141,45	160,21
LaHLA26a	Lara	Embalse	37,67	10,61	3,01	1,78	239,83	150,59	89,23
LaHLA26b	Lara	Embalse	39,09	10,33	2,58	1,34	195,88	129,01	66,86
LaHLA27a	Lara	Pozo	209,02	42,23	117,15	2,17	5971,37	5862,66	108,71
LaHLA27b	Lara	Pozo	191,38	42,86	116,79	2,41	5965,40	5844,66	120,73
LaHLA28a	Lara	Embalse	76,11	28,95	15,65	2,69	917,73	782,99	134,74
LaHLA28b	Lara	Embalse	76,98	35,08	17,43	6,54	1199,52	872,08	327,45
LaHLA29a	Lara	Quebrada	45,87	3,83	1,47	1,79	163,37	73,65	89,72
LaHLA29b	Lara	Quebrada	42,66	3,69	1,23	0,40	81,55	61,59	19,95
FaHFA30a	Falcón	Embalse	56,86	19,87	28,98	2,04	1552,18	1450,27	101,92
FaHFA30b	Falcón	Embalse	53,10	19,16	27,80	2,02	1492,12	1391,16	100,96
FaHFA31a	Falcón	Embalse	31,96	16,95	9,82	1,18	550,78	491,61	59,17
FaHFA31b	Falcón	Embalse	34,03	17,88	9,79	1,51	565,73	489,93	75,81
AHLL32a	Apure	Rio	11,68	5,54	2,63	1,56	209,33	131,48	77,85
AHLL32b	Apure	Rio	11,94	5,45	2,63	1,32	197,97	131,83	66,14
AHLL33a	Apure	Pozo	30,10	14,14	13,61	1,97	779,35	681,00	98,35
AHLL33b	Apure	Pozo	31,84	13,75	14,10	2,05	808,26	705,45	102,81
AHLL34a	Apure	Pozo	20,13	13,84	29,79	1,21	1551,65	1490,95	60,70
AHLL34b	Apure	Pozo	27,63	13,16	29,43	1,33	1539,64	1472,92	66,72
AHLL35a	Apure	Pozo	23,71	14,35	9,80	1,51	566,13	490,31	75,82
AHLL35b	Apure	Pozo	20,52	12,22	12,11	1,25	668,66	605,96	62,69

Continuación de la **Tabla 27**: Concentración de elementos analizados, durezas calculadas y fuente de abastecimiento en muestras de agua para el consumo humano de 9 estados y Distrito Capital

Muestra	Estado que abastece	Fuente de Abastecimiento	Concentraciones (mg/L)				Dureza (ppm CaCO ₃)		
			Ca	Mg	Na	K	Total	cálcica	magnésica
AHLL36a	Apure	Pozo	16,26	16,39	17,73	0,92	933,26	887,42	45,84
AHLL36b	Apure	Pozo	31,64	16,01	18,31	0,97	964,92	916,56	48,36
AHLL37a	Apure	Pozo	17,56	25,86	20,91	0,97	1095,25	1046,67	48,58
AHLL37b	Apure	Pozo	16,54	19,82	25,15	1,16	1316,39	1258,55	57,84
CaHCE38a	Carabobo	Embalse	12,50	14,26	16,56	3,50	1003,99	828,80	175,19
CaHCE38b	Carabobo	Embalse	13,21	14,02	16,24	3,59	992,34	812,71	179,63
CaHCE39a	Carabobo	Embalse	24,08	13,95	31,85	7,22	1955,21	1593,80	361,40
CaHCE39b	Carabobo	Embalse	25,63	15,32	36,06	8,27	2218,83	1804,78	414,04
ZuHL40a	Zulia	Rio y Pozos	1,50	1,84	2,32	0,87	159,65	116,19	43,47
ZuHL40b	Zulia	Rio y Pozos	6,28	2,55	2,80	1,42	211,19	140,22	70,97
ZuHL41a	Zulia	Embalse	24,61	7,74	7,54	2,38	496,45	377,52	118,92
ZuHL41b	Zulia	Embalse	23,40	7,61	7,79	2,33	506,43	389,82	116,61
YaADY42a	Yaracuy	Rio	81,79	24,84	4,02	0,95	248,89	201,25	47,64
YaADY42b	Yaracuy	Rio	77,64	23,96	3,84	0,94	239,33	192,25	47,07
YaADY43a	Yaracuy	Rio	78,54	22,79	3,87	0,86	236,65	193,54	43,11
YaADY43b	Yaracuy	Rio	73,92	21,08	3,73	0,91	232,05	186,73	45,32
YaADY44a	Yaracuy	Embalse	73,96	23,73	18,08	4,31	1120,73	904,92	215,81
YaADY44b	Yaracuy	Embalse	75,61	24,37	19,07	3,95	1152,38	954,55	197,84
YaADY45a	Yaracuy	Rio	88,48	22,46	7,07	2,62	485,38	354,04	131,34
YaADY45b	Yaracuy	Rio	94,86	21,71	6,87	2,52	469,73	343,83	125,90
YaADY46a	Yaracuy	Rio	45,07	8,33	5,63	1,62	362,99	281,86	81,13
YaADY46b	Yaracuy	Rio	43,95	8,02	5,95	1,47	371,04	297,59	73,44
YaADY47a	Yaracuy	Manantial	164,97	22,39	4,40	0,85	262,69	220,34	42,36
YaADY47b	Yaracuy	Manantial	167,05	22,62	4,54	0,81	267,83	227,32	40,51

Pesos equivalentes:	Miliequivalentes de Ca ²⁺ y Mg ²⁺ :	Dureza total (Dt):
Ca ²⁺ = 20,04 Mg ²⁺ = 12,15	Meq Ca ²⁺ = ppm Ca ²⁺ /20,04 Meq Mg ²⁺ = ppm Mg ²⁺ /12,15	Dt= dureza cálcica (Dc) + dureza magnésica (Dm)
Dureza Cálcica expresada como ppm CaCO₃ Dc(mg/L)=(Meq Ca ²⁺)*50	Dureza Magnésica expresada como ppm CaCO₃ Dm(mg/L)= (Meq Mg ²⁺)*50	Dureza Total expresada como ppm CaCO₃ Dt(mg/L)= (Meq Ca ²⁺ + Meq Mg ²⁺) *50

Figura 39: Ecuaciones y datos para calcular la dureza total, cálcica y magnésica



APENDICE K: Datos fisicoquímicos proporcionados por algunas plantas de tratamiento de aguas para el consumo humano de 9 estados y Distrito Capital

Tabla 28: Datos de pH proporcionados por algunas plantas de tratamiento de agua potable

Muestra	pH	Muestra	pH	Muestra	pH
ZuHL40b	6,05	AHLL32b	7,00	VaHCA9a	7,54
LaHLA24a	6,17	DCHCA16a	7,02	VaHCA10a	7,56
MeADM4b	6,27	LaHLA27a	7,04	YaADY47b	7,56
MiHCA20b	6,33	VaHCA8a	7,07	LaHLA25a	7,57
MiHCA13a	6,59	DCHCA22b	7,07	FaHFA30a	7,58
DCHCA11a	6,60	MeADE1b	7,09	MiHCA18a	7,60
MiHCA21b	6,60	MeADM3b	7,10	YaADY44b	7,60
MiHCA19b	6,68	ZuHL40a	7,12	VaHCA9b	7,64
DCHCA11b	6,69	YaADY47a	7,18	YaADY43b	7,65
MiHCA21a	6,70	MeADM5b	7,20	YaADY43a	7,67
MeADM6b	6,71	MiHCA12a	7,20	MeADM5a	7,70
DCHCA23a	6,76	DCHCA14a	7,20	YaADY42b	7,70
AHLL33a	6,80	MiHCA15a	7,20	YaADY44a	7,70
AHLL34a	6,80	AHLL32a	7,20	MiHCA17a	7,72
AHLL35a	6,80	MeADM3a	7,30	FaHFA31a	7,72
AHLL35b	6,80	VaHCA10b	7,31	ZuHL41b	7,72
AHLL36a	6,80	MeADM6a	7,33	LaHLA28a	7,78
AHLL37a	6,80	MiHCA13b	7,34	MeADM2a	7,80
DCHCA22a	6,88	FaHFA30b	7,37	YaADY42a	7,80
DCHCA16b	6,90	MeADM7a	7,40	YaADY46b	7,89
MeADM4a	6,93	DCHCA14b	7,40	LaHLA26a	7,92
DCHCA23b	6,96	AHLL33b	7,40	YaADY45b	7,96
MiHCA19a	6,97	AHLL36b	7,40	MiHCA18b	8,10
MeADM2b	7,00	ZuHL41a	7,40	YaADY45a	8,13
MeADM7b	7,00	MeADE1a	7,49	AHLL34b	8,20
MiHCA12b	7,00	VaHCA8b	7,49	MiHCA17b	8,23
MiHCA15b	7,00	FaHFA31b	7,49	YaADY46a	8,43
MiHCA20a	7,00	LaHLA29a	7,52	AHLL37b	8,50



Tabla 29: Datos de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) proporcionados por algunas plantas de tratamiento de agua potable

Muestra	Conductividad	Muestra	Conductividad
VaHCA8a	110,00	MiHCA12a	311,00
MiHCA21a	123,00	MiHCA18b	312,00
VaHCA8b	124,00	MiHCA12b	317,00
MiHCA21b	134,00	FaHFA31a	354,00
MiHCA20a	134,10	FaHFA31b	358,00
MiHCA20b	144,70	AHLL35b	393,00
AHLL32b	159,00	MiHCA15b	434,00
MiHCA19a	160,10	MiHCA15a	435,00
MiHCA17a	175,00	AHLL35a	442,00
AHLL32a	175,00	AHLL36a	468,00
MiHCA19b	178,40	YaADY43a	496,00
MiHCA17b	186,00	AHLL33b	498,00
MiHCA13b	205,00	YaADY43b	502,00
ZuHL41b	210,00	AHLL36b	520,00
ZuHL41a	214,00	YaADY42b	523,00
ZuHL40a	214,00	AHLL37b	525,00
VaHCA10a	218,00	FaHFA30a	527,00
MiHCA13a	233,00	YaADY42a	532,00
VaHCA10b	238,00	FaHFA30b	533,00
DCHCA11a	252,00	DCHCA23b	542,00
DCHCA11b	257,00	DCHCA23a	562,00
DCHCA16a	268,00	YaADY45a	577,00
ZuHL40b	272,00	AHLL33a	582,00
VaHCA9b	281,00	YaADY45b	587,00
VaHCA9a	285,00	YaADY44b	590,00
DCHCA16b	286,00	YaADY44a	605,00
DCHCA14a	290,00	AHLL34b	625,00
DCHCA14b	294,00	AHLL37a	636,00
YaADY46a	296,00	AHLL34a	674,00
YaADY46b	301,00	YaADY47a	893,00
MiHCA18a	311,00	YaADY47b	898,00



Tabla 30: Datos de Alcalinidad (mg/L) CaCO_3 proporcionados por algunas plantas de tratamiento de agua potable

Muestra	Alcalinidad mg/L
LaHLA24a	15,40
ZuHL40b	17,40
MeADE1b	20,00
MeADM3b	20,00
MeADM3a	21,00
MeADE1a	22,00
MeADM5b	25,00
MeADM5a	27,00
MeADM4b	27,41
ZuHL40a	29,60
MeADM6b	29,93
MeADM4a	31,40
MeADM6a	36,57
MeADM7b	51,00
MeADM7a	55,00
MeADM2a	74,00
ZuHL41a	80,40
MeADM2b	86,00
ZuHL41b	86,80
LaHLA25a	99,00
YaADY46b	104,00
YaADY46a	106,00
LaHLA29a	110,00
LaHLA26a	120,00
YaADY42b	120,00
YaADY45b	120,00
YaADY42a	124,00
YaADY45a	128,00
YaADY43b	137,00
YaADY43a	141,00
YaADY44b	162,00
LaHLA28a	165,00
YaADY44a	166,00
YaADY47b	236,00
LaHLA27a	253,00
YaADY47a	264,00