



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL BALANCE DE CONSTITUYENTES
HIDROGEOQUÍMICOS SOBRE EL USO SUSTENTABLE DEL AGUA DEL
ACUÍFERO DEL MUNICIPIO SAN DIEGO EN EL PERÍODO 2015 – 2018**

Autor: Gerardo Huguet Sierra
Tutora: Profesora Adriana Márquez

Naguanagua, Junio de 2021



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL BALANCE DE CONSTITUYENTES
HIDROGEOQUÍMICOS SOBRE EL USO SUSTENTABLE DEL AGUA DEL
ACUÍFERO DEL MUNICIPIO SAN DIEGO EN EL PERÍODO 2015 – 2018**

AUTOR: Gerardo Huguet Sierra

Trabajo de grado presentado al Área de Estudios de Postgrado de la
Universidad de Carabobo para optar al título de Magister en Ingeniería
Ambiental

Naguanagua, Junio de 2021



**Acta de discusión y veredicto del Jurado en la
Presentación de Trabajo de Grado
en modalidad virtual**

TG-3



Postgrado Ingeniería
Universidad de Carabobo

Valencia, 09 de Julio de 2021

En atención a lo dispuesto en los artículos 148, 137 y 138 del Reglamento de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo, Gaceta 619, quienes suscribimos como jurado designado por el Consejo de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Profa. ADRIANA MERCEDES MÁRQUEZ ROMANCE según oficio CPFI-005-DEIC, de fecha 24/02/2021, Profa. LAURA TERESA ALBANO ORDOÑEZ, según oficio CPFI-006-DEIC, de fecha 24/02/2021 y Profa. MARIA LUISA ESCALONA DE ZAPATA, según oficio CPFI-008-DEIC, de fecha 24/02/2021, para revisar y evaluar el Trabajo de Grado Titulado:

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL BALANCE DE CONSTITUYENTES
HIDROGEOQUÍMICOS SOBRE EL USO SUSTENTABLE DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL
MUNICIPIO SAN DIEGO EN EL PERIODO 2015-2018”**

Bajo la línea de investigación: **Impacto ambiental del desarrollo urbano, industrial y agrícola de la región central de Venezuela**

Presentado por el Estudiante Graduado **GERARDO ARTURO RODOLFO HUGUET SIERRA**, cédula de identidad **V-4.859.589**, para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental, ha decidido que el mismo está:

Apellidos y Nombres del Jurado	Cédula de identidad	Veredicto individual
DR. ADRIANA MERCEDES MÁRQUEZ ROMANCE (PRESIDENTE)	V – 12.604.007	Aprobado
MSC. LAURA TERESA ALBANO ORDOÑEZ (JURADO INTERNO)	V – 13.470.475	Aprobado
MSC. MARIA LUISA ESCALONA DE ZAPATA (JURADO EXTERNO)	V – 12.606.481	Aprobado
Veredicto final: Aprobado		

Tomando en cuenta que las razones que motivan la decisión son:

1. **Respecto al análisis de la situación contexto o problema:** se encontró en el entorno de la Universidad de Carabobo.
2. **Respecto a la fundamentación teórica:** fortalecimiento de los fundamentos teóricos de los acuíferos confinados derivados de las pruebas de campo.
3. **Respecto al método desarrollado:** los procedimientos dan respuestas a los objetivos de la investigación.
4. **Respecto a los análisis derivados:** se encontró claridad, nitidez y capacidad de réplica del estudio en cuanto a la influencia de los parámetros hidrogeoquímicos sobre el uso sustentable del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo.
5. **Respecto al uso de fuentes bibliográficas:** el trabajo de grado estuvo fundamentado en 21 tesis de pregrado de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo desarrolladas determinando



Acta de discusión y veredicto del Jurado en la Presentación de Trabajo de Grado en modalidad virtual

TG-3



Postgrado Ingeniería
Universidad de Carabobo

propiedades en el acuífero del Municipio San Diego durante el período de estudio 2015-2018, lo que confiere actualización.

Cada miembro del jurado constituido de manera virtual, a viva voz expresó su veredicto individual el cual quedó grabado por el Administrador (Host – Hospedador) el Estudiante Graduado **GERARDO ARTURO RODOLFO HUGUET SIERRA**, cédula de identidad **V – 4.859.589** de la Plataforma acordado para esta presentación, **ZOOM**.

El Presidente del Jurado, previamente identificado anteriormente, después de oír los miembros del Jurado, toma la palabra y expone: Estando dentro del lapso concedido al estudiante, y ya subsanado en cada una de las observaciones hechas con antelación, se da por cumplido los extremos establecidos en el artículo 140 del Reglamento de los Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo. No habiendo más nada que tratar, se da por terminado el acto a las 11:00 am. Se leyó y conformes firman.

Firma
Presidente del Jurado
Dr. ADRIANA MERCEDES
MÁRQUEZ ROMANCE

Firma
Miembro del Jurado
MSc. LAURA TERESA ALBANO
ORDOÑEZ

Firma
Miembro del Jurado
MSc. MARIA LUISA ESCALONA DE
ZAPATA



**Acta de discusión y veredicto del Jurado en la
Presentación de Trabajo de Grado
en modalidad virtual**

TG-3



Postgrado Ingeniería
Universidad de Carabobo

Comentarios adicionales:

Importante: Esta acta debe ser enviada en formato digital al presidente del jurado, con copia a todos los miembros del Jurado.

Tabla de contenido

<i>INDICE DE FIGURAS</i>	<i>vi</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	<i>x</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>xii</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>1</i>
<i>CAPÍTULO I EL PROBLEMA</i>	<i>4</i>
Planteamiento del Problema	4
Formulación del problema.....	7
Objetivo General.	8
Objetivos Específicos.....	8
Justificación.	9
Delimitación del trabajo.....	10
<i>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO</i>	<i>11</i>
Antecedentes de la Investigación	11
Bases Teóricas	13
Acuífero.	13
Acuitardos.....	14
Acuicludos.	14
Acuífero libre.....	14
Acuífero semi-confinado.	14
Acuífero confinado.....	15
Porosidad y porosidad efectiva.....	16
Permeabilidad.....	16
Coeficiente de almacenamiento S.	17
Transmisividad T.	17
Nivel freático.....	18
Infiltración y recarga.	18
Pozo profundo.	18

Litología del pozo profundo.....	18
Nivel estático.	20
Balance hidrogeológico.....	20
Calidad del agua subterránea (para abastecimiento).	21
Sólidos Disueltos.	22
Conductividad.	22
Nitratos.	23
Dureza.	23
Número más probable de Coliformes (NMP).	24
Gestión integrada de los recursos hídricos GIRH.....	25
Uso conjunto del agua.	25
Disponibilidad del recurso agua (recurso hídrico).	26
Uso sustentable del agua.	27
Geoestadística.....	29
Bases Legales	30
Marco referencial o geográfico.....	33
<i>CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO.....</i>	<i>36</i>
3.1 Nivel de la investigación.....	36
3.2 Diseño de la investigación	36
3.3 Unidad y variables de investigación	37
3.4 Población y muestra.....	38
3.5 Fases de la investigación y técnicas de recolección de datos.	53
<i>CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSION.....</i>	<i>72</i>
4.1 Caracterización de constituyentes hidro-geoquímicos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo en el período 2015 a 2018.....	72
Dureza.	90
Cloruros.	90
Sulfatos.....	90
Nitratos.	91

Calcio.....	91
Sodio.....	91
Sólidos disueltos.....	91
Conductividad.....	92
4.2 Resultados de la estimación de los parámetros geofísicos e hidráulicos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo.....	93
4.3 Estimación de los parámetros de balance del agua subterránea del acuífero San Diego en el período 2015-2018	99
Precipitación, evapotranspiración e infiltración.....	99
4.4 Análisis de la influencia de los constituyentes hidro-geoquímicos del acuífero sobre el uso sustentable del agua.....	105
Disponibilidad del recurso hídrico.....	105
Estimación del volumen almacenado.....	105
Tasa de extracción.....	106
Calidad del agua extraída.....	108
Gestión integrada del recurso hídrico	108
<i>CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	<i>110</i>
Conclusiones	110
Recomendaciones	111
<i>REFERENCIAS.....</i>	<i>113</i>
<i>ANEXOS</i>	<i>121</i>

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Cuenca del río San Diego. (Trazada sobre imagen tomada de Google Maps, 2018).....	5
<i>Figura 2.</i> División de sectores del municipio San Diego (Alcaldía Municipio San Diego, 2015).	6
<i>Figura 3.</i> Acuíferos. (Collazo C., 2012, Manual de agua subterránea) ..	13
<i>Figura 4.</i> Esquema de un acuífero semi-confinado. (Según González de V., 2002).....	15
<i>Figura 5 .</i> Acuífero con zona confinada, zona confinada artesiana y zona libre de recarga (Werner, 1996).	16
<i>Figura 6.</i> Valores de permeabilidad típicos de diferentes terrenos naturales (Custodio y Llamas 1983, citado por Collazo C., 2012).....	17
<i>Figura 7.</i> Clasificación de suelos gruesos y finos por el USCS usado en ingeniería (tomado de: https://civilgeeks.com/2015/07/11/apuntes-del-sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-s-u-c-s/)	19
<i>Figura 8.</i> Ejemplos de diagramas de Stiff de tres muestras de agua. (De: https://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html).....	24
<i>Figura 9.</i> Dimensiones de la sostenibilidad de una actividad o proceso.	27
<i>Figura 10.</i> Cuenca del Lago de Valencia.	34
<i>Figura 11.</i> Area del acuífero de San Diego con ubicación de los pozos profundos de la zona. (Márquez, 2018).....	35
<i>Figura 12:</i> Ubicación de los pozos de muestreo de caudales administrados por la empresa Hidrológica del Centro (HIDROCENTRO) en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo.	41
<i>Figura 13:</i> Ubicación de los pozos de muestreo de caudales y niveles de aguaregistrados en el MINEA del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo.....	44

<i>Figura 14:</i> Ubicación de los pozos administrados por HIDROCENTRO y urbanizaciones privadas para muestreo de caudales y niveles de agua en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, obtenidos desde tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC).....	48
<i>Figura 15:</i> Ubicación de los pozos registrados en MINEA para el muestreo de los parámetros fisicoquímicos en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo	51
<i>Figura 16:</i> Ubicación de los pozos registrados de HIDROCENTRO y urbanismos privados para el muestreo de los parámetros fisicoquímicos en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, por el Centro de Investigaciones de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC).	53
<i>Figura 17:</i> Sonda para medir nivel, modelo PLM, marca Seba Hydrometrie.....	55
<i>Figura 18:</i> Medición del nivel del agua con una cinta eléctrica graduada..	57
<i>Figura 19:</i> Perfiles litológicos en la cuenca del acuífero de San Diego, Estado Carabobo.....	61
<i>Figura 20:</i> Gráfico de la función de pozo $W(u)$ vs (u) . Curva Típica..	63
<i>Figura 21:</i> Gráfico de los valores $(h_0 - h)$ vs. (r^2/t)	64
<i>Figura 22:</i> Superposición de las Figuras 21 y 22.	64
<i>Figura 23:</i> Flujo de trabajo para el modelado geoestadístico espacio-temporal de parámetros de balance hídrico en el acuífero San Diego, Estado Carabobo, Venezuela.....	66
<i>Figura 24:</i> Variación de los flujos de bombeo en los pozos del Municipio San Diego, Estado Carabobo en el período 2015-2018.	73
<i>Figura 25:</i> Distribución de los flujos de bombeo en los pozos del Municipio San Diego, Estado Carabobo en el período 2015-2018.....	74

Figura 26: Distribución de los flujos de bombeo en los pozos del Municipio San Diego, Estado Carabobo en el período 2015-2018..... 75

Figura 27: Frecuencia de ocurrencia de las concentraciones de aniones en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021. 77

Figura 28: Distribución espacial de las concentraciones de aniones en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021. 82

Figura 29: Frecuencia de ocurrencia de las concentraciones de cationes en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021. 83

Figura 30: Distribución espacial de las concentraciones de cationes en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2019. 84

Figura 31: Frecuencia de ocurrencia de las concentraciones de las propiedades en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021. 85

Figura 32: Distribución espacial de las propiedades de los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2019..... 86

Figura 33: Frecuencia de ocurrencia de las concentraciones de las propiedades en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021. 87

<i>Figura 34:</i> Distribución espacial de las propiedades de los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2019.....	88
<i>Figura 35:</i> Distribución espacial de la clasificación del agua según diagrama de Piper – Hill – Langelier sobre especies iónicas: 1) Bicarbonato de Ca o Mg, 2) Bicarbonato de Na, 3) Sulfato o Cloruro de Ca o de Mg, 4) Sulfato o Cloruro de Na.	93
<i>Figura 36:</i> Identificación en el área del acuífero de 28 pozos con registro de perfiles litológicos, y datos de relieve (Márquez, 2018).	94
<i>Figura 37:</i> Frecuencia de ocurrencia del coeficiente de almacenamiento del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015-2019.	97
<i>Figura 38:</i> Frecuencia de ocurrencia del coeficiente de transmisividad del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015-2019.	98
<i>Figura 39:</i> Distribución espacial del coeficiente de transmisividad del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015-2019.	98
<i>Figura 40:</i> Diagrama de cajas y bigotes de la precipitación en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015.	100
<i>Figura 41:</i> Diagrama de cajas y bigotes de la evapotranspiración en el acuífero del Municipio San Diego, durante el período 2015.	102
<i>Figura 42:</i> Diagrama de cajas y bigotes de la infiltración en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015.	103
<i>Figura 43:</i> Diagrama de cajas y bigotes del flujo de bombeo desde el acuífero del Municipio San Diego, durante el período 2015.	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las aguas clasificadas como Tipo 1A	32
Tabla 2: Componentes del muestreo por racimos para caudal y nivel de agua desde los pozos administrados por la empresa Hidrológica del Centro (HIDROCENTRO) en acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo. ..	40
Tabla 3: Componentes del muestreo por racimos para caudales y niveles de agua desde los pozos administrados por el Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas (MINEA) en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo.....	42
Tabla 4: Componentes del muestreo por racimos para la medición de caudales y niveles desde los pozos administrados por el Ministerio del Poder Popular por HIDROCENTRO y urbanizaciones privadas en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, obtenidos desde tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC).	45
Tabla 5: Componentes del muestreo por racimos para el muestreo de parámetros fisicoquímicos desde los pozos registrados en el MINEA del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, obtenidos desde tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC).....	50
Tabla 6: Componentes del muestreo por racimos para el muestreo de parámetros fisicoquímicos desde los pozos administrados por HIDROCENTRO y urbanizaciones privadas en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, obtenidos desde tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC)	52
Tabla 7: Método para la determinación de los parámetros fisicoquímicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, según el Laboratorio Ambiental Aragua.....	59

Tabla 8: Método para la determinación de los parámetros bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, según el Laboratorio Ambiental Aragua.....	59
Tabla 9: Parámetros físico-químicos del agua en el acuífero y comparación con las normas de calidad de agua.	89
Tabla 10: Resumen de las litologías, porosidad efectiva y permeabilidad en 28 registros de pozos.	95
Tabla 11: Resumen de los parámetros estadísticos de los coeficientes de transmisividad y almacenamiento en el acuífero del Municipio San Diego en el período 2015-2019.	97
Tabla 12: Precipitación en el área del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, expresada en mm totales por mes.....	99
Tabla 13: Evapotranspiración en el área del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, expresada en mm totales por mes.	101
Tabla 14: Infiltración en el área del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, expresada en mm totales por mes.....	102
Tabla 15: Volumen extraído con pozos profundos desde el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, expresado en m ³ /año.	103
Tabla 16: Población y demanda futuras en San Diego.	107



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA DE INGENIERÍA
AMBIENTAL**



**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL BALANCE DE CONSTITUYENTES
HIDROGEOQUÍMICOS SOBRE EL USO SUSTENTABLE DEL AGUA DEL
ACUÍFERO DEL MUNICIPIO SAN DIEGO EN EL PERÍODO 2015 – 2018**

Autor: Gerardo Huguet Sierra
Tutora: Dra. Adriana Márquez
Fecha: Junio, 2021

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo analizar e interpretar los constituyentes o parámetros hidro-geológicos, físicos y químicos del acuífero de San Diego para caracterizarlo y determinar su influencia en el uso sustentable del agua subterránea para el abastecimiento de esta localidad. El municipio San Diego abarca la mayor parte del área del acuífero, y es una zona de alto desarrollo urbano que actualmente necesita el aporte de agua subterránea debido al déficit que presenta el suministro principal proveniente del Sistema Regional del Centro. Dicho acuífero es un conjunto de estratos geológicos ubicados dentro de los límites de la cuenca del río San Diego, en el estado Carabobo, que son capaces de almacenar agua subterránea y de transmitirla. Se investigaron datos de litología, porosidad, nivel de bombeo, los cuales permiten calcular una estimación del volumen de agua disponible en el acuífero. Respecto a la calidad del agua, los datos de dureza, cloruros, sulfatos, nitratos, conductividad, calcio, magnesio, pH, muestran que el agua hacia el centro y norte del acuífero es de buena calidad, pudiendo clasificarla como tipo 1A, mientras que hacia el extremo sur – este es de menor calidad, donde los parámetros minerales resultan más elevados, lo que se relaciona con probable intrusión del agua salobre del Lago de Valencia. Se concluye estableciendo que el volumen de agua subterránea, su disponibilidad, factibilidad de extracción y su calidad, la hacen apta para el abastecimiento urbano y que dicha extracción es sustentable. Pero se deberá diseñar una mejor gestión tipo integrado, considerando el aporte del Sistema Regional del Centro y la adecuación de las redes de distribución.

Palabras clave: Municipio San Diego, agua subterránea, acuífero, calidad del agua, recurso hídrico, pozo profundo, uso sustentable del agua.

INTRODUCCIÓN

El planeta tierra contempla en su naturaleza al agua, el cual se encuentra naturalmente en muchas formas y lugares, tales como la superficie, bajo tierra y en los océanos. El agua puede presentarse como agua dulce o agua salada, por ser el caso de estudio el agua dulce, se puede señalar que esta representa únicamente el 2,5% del agua de la tierra y se encuentra en mayor parte congelada en glaciares y casquetes glaciares. Aproximadamente el 96% del agua dulce en estado líquido se localiza en aguas subterráneas y la pequeña fracción restantes se encuentra en la superficie y en la atmosfera.

En el subsuelo se encuentran formaciones geológicas consistentes a veces en rocas porosas (arenas, gravas, etc.), o fracturadas (calizas, areniscas, lavas, etc.) las cuales pueden contener agua en sus espacios. Esta agua se denomina agua subterránea y los terrenos que la contienen y la pueden ceder se denominan acuíferos. La cantidad de agua que puede captarse de un acuífero, a corto plazo, depende principalmente del volumen de poros y grietas de la roca que contiene el agua, de su permeabilidad y de la diferencia de niveles entre el agua en la captación y en la roca que lo aloja.

Sin embargo, a largo plazo, la cantidad de agua que puede captarse depende del volumen total del agua almacenada en el acuífero y del ritmo de reposición de esta agua almacenada a partir de las lluvias o de masas de agua superficiales. Hay pues en cada captación dos parámetros condicionantes de la cantidad de agua utilizable: uno es el caudal instantáneo que puede dar la captación, otro es el volumen global que la formación acuífera puede ceder a la captación a lo largo de un ciclo hidrológico (anual). Estos dos conceptos se han confundido a veces, especialmente en aforos de pozos, extrapolándose indebidamente lo que es caudal instantáneo a volumen anual.

Se destaca el valor ambiental y sanitario del agua subterránea al observar que los acuíferos guardan volúmenes elevados de agua sin riesgo de evaporación ni de acumulación de sedimentos como ocurre en los embalses, teniendo alta capacidad de regulación (Rocha F. 1993).

Hoy en día, el volumen de agua subterránea extraída a escala mundial se estima en torno a los 600-700 km³/año, de los que aproximadamente el 70 % están destinados a usos agrícolas, el 25 % a usos urbanos, y un 5 % a usos industriales (Llamas R. et al., 2000). Aunque su utilización es predominante en el regadío, su uso para satisfacer la demanda de agua potable es esencial en muchas regiones.

Por otra parte, Venezuela se encuentra representada en el caso de los acuíferos o depósitos explotables de agua subterránea, por una superficie total de 829.000 Km² (Guevara y Cartaya, 2004), los cuales a través de estudios preliminares se han estimado en cinco millones de metros cúbicos por año (5.000.000 m³/año). Además, se han encontrado hasta la actualidad, la formación de distintos acuíferos importantes los cuales se emplean para suministro de agua (MPP de Ecosocialismo, 2011).

En Venezuela las zonas más pobladas poseen grandes sistemas de abastecimiento de agua con fuentes superficiales (MPP de Ecosocialismo, 2011). El difícil acceso al agua debido a problemas de planificación urbanística, contaminación del agua o el poco mantenimiento en las plantas de potabilización, ha generado una creciente tendencia a la creación de pozos de agua, bien sea por su potabilidad o por su fácil acceso en comparación con un sistema de fuente superficial. El problema radica en la creación desmesurada y no planificada de los mismos.

El aprovechamiento del agua subterránea se encuentra bastante desarrollado en Venezuela. En la región centro – norte de Venezuela, concretamente en el estado Carabobo, existen áreas pobladas que dependen casi exclusivamente del abastecimiento desde fuentes subterráneas, como ocurre en Bejuma, Montalbán y Miranda, las zonas rurales de los municipios Libertador y Carlos Arvelo, o sectores urbanos de Valencia, Tocuyito, San Diego, Guacara, San Joaquín, entre otros (MPP de Ecosocialismo, 2011).

En el presente trabajo, el conocimiento de los parámetros hidráulicos de los pozos de San Diego permitirá emprender el monitoreo de su sustentabilidad y así evitar la sobre explotación, también generar una base de datos para las autoridades de San Diego para su desarrollo urbanístico a futuro y así obtener una buena administración del agua.

Para el desarrollo de la investigación se utilizó la estructuración mediante capítulos como se describen a continuación: Capítulo I o El Problema, contiene el planteamiento del problema, la formulación del mismo, el objetivo general y los específicos, así como la justificación de la investigación y su delimitación. El Capítulo II o Marco Teórico, comprende los antecedentes de la investigación, las bases teóricas y las bases legales que la sustentan. Capítulo III o Marco Metodológico, está definido por el tipo y diseño de la investigación, la población y muestra, las variables de la investigación, las técnicas de recolección de los datos y las fases para realizar el trabajo. El Capítulo IV muestra los resultados obtenidos y su discusión, mostrando en el Capítulo V las conclusiones y recomendaciones de dicho estudio

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Planteamiento del Problema

Una de las zonas donde se han realizado recientes investigaciones de campo de las aguas subterráneas es el municipio San Diego. Este municipio tiene un límite político – territorial que coincide con la cuenca del río San Diego y a su vez incluye el acuífero de San Diego. Está limitado al Este, Norte y Sur por formaciones montañosas, y en el centro posee características de valle aluvional, que es donde se ha establecido su desarrollo urbano. La cuenca del río San Diego se prolonga hacia el municipio Los Guayos hacia el sur, donde el mismo cauce es conocido como río Los Guayos, cuya descarga ocurre en el Lago de Valencia.

En el área del municipio San Diego se estima (Alcaldía San Diego, 2017) una población urbana de aproximadamente 140.000 habitantes para el año 2017, mientras que el INE reporta un crecimiento poblacional acelerado entre los censos consecutivos 2001 y 2011. Además, se concentra en la parte sur del municipio una zona de industrias y empresas comerciales. En total, representa una demanda aproximada o consumo medio de más de 400 L/seg (Sánchez J., 2013).

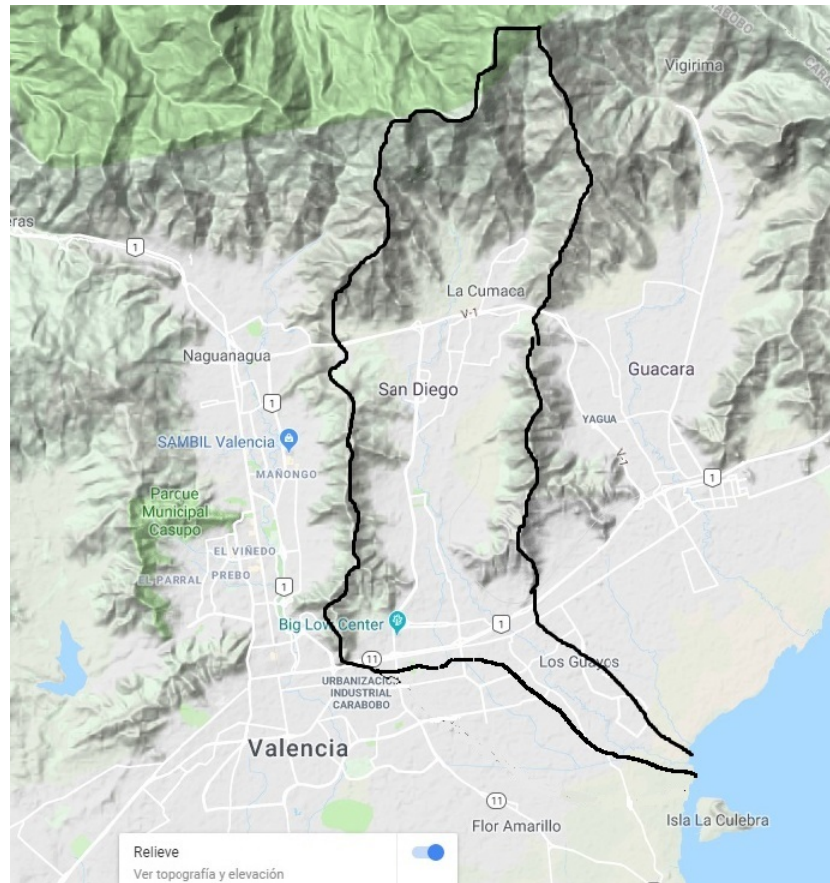


Figura 1. Cuenca del río San Diego. (Trazada sobre imagen tomada de Google Maps, 2018).

Para satisfacer esa demanda o abastecimiento de agua de toda esta población, el área urbana del municipio cuenta con un sub-sistema del Sistema Regional del Centro, con aportes de las grandes líneas de aducción provenientes de Valencia, estación de bombeo en Castillito, tuberías matrices en el eje de la Av. Don Julio Centeno, y redes de distribución en cada urbanización y sector. Adicionalmente, el norte de pueblo San Diego cuenta con la fuente superficial de La Cumaca, donde se capta dicha fuente en el sitio de igual nombre para llevar el suministro de agua a los sectores cercanos, hasta parte del norte del pueblo, con una producción promedio entre 20 y 30 L/seg (Sánchez J., 2013).



Figura 2. División de sectores del municipio San Diego (Alcaldía Municipio San Diego, 2015).

Adicionalmente, el municipio cuenta con aproximadamente 58 pozos profundos activos (MINEA, 2017), siendo la mayor parte para uso doméstico. Este uso se refiere a que tales pozos suministran agua directamente a las redes de distribución de los sectores vecinos a ellos, representando una proporción importante del aporte de agua de consumo. Esta elevada cantidad de pozos profundos se debe principalmente a que se han tratado de compensar los problemas que presenta el Sistema Regional del Centro en San Diego, ya que no logra cubrir las demandas de caudal de todos los sectores, y tampoco opera continuamente, puesto que se recibe agua de ese sistema en

forma intermitente, dos o tres veces por semana durante unas 12 a 20 horas cada vez. Esta situación tiende a acentuarse debido al elevado crecimiento urbano y comercial del municipio (Sánchez J., 2013).

Otro aspecto adicional al uso del agua subterránea es lo relacionado a su calidad. En este contexto del uso para abastecimiento urbano, sus características físico-químicas deben permitir el consumo (doméstico, industrial o agropecuario) sin necesidad de requerir sistemas de potabilización los cuales elevan los costos de producción.

Se dan casos en que una elevada extracción de agua subterránea modifique las condiciones del acuífero, sus niveles o su flujo original, produciendo la intrusión de agua de inferior calidad, como en las cercanías del mar, o de lagos salobres como el Lago de Valencia.

Por lo tanto, como una importante fuente de abastecimiento que es el acuífero de San Diego, se deben estudiar sus características, los factores que intervienen en el balance del agua del medio geológico subterráneo, y su calidad. Estos son aspectos clave ya que es preciso realizar una gestión apropiada de este recurso, al usarlo como fuente de abastecimiento de las redes de acueducto para su población bajo esquemas de uso sustentable (Ley de Aguas, art. 10 y 11, 2007).

Formulación del problema.

¿Qué cantidad de agua subterránea se extrae en el área del acuífero de San Diego y cómo es la distribución de los pozos profundos?

¿Qué características físicas e hidráulicas tiene el acuífero de San Diego en los lugares donde se encuentran los pozos profundos?

¿Cómo es la calidad del agua extraída del acuífero de San Diego sobre la base de sus parámetros físico-químicos?

¿Permiten las condiciones hidrogeológicas y características físico-químicas del agua subterránea del acuífero de San Diego disponer de ella como fuente de abastecimiento en forma sustentable?

Objetivo General.

Evaluar los constituyentes hidro-geoquímicos del acuífero de San Diego en el período 2015-2018, en relación a su balance e influencia sobre el uso sustentable del agua para abastecimiento urbano.

Objetivos Específicos.

1. Caracterizar los constituyentes hidro-geoquímicos del acuífero de San Diego en el período 2015-2018.
2. Determinar los parámetros geofísicos e hidráulicos del acuífero del Municipio San Diego en el período 2015-2018
3. Determinar los parámetros de balance del agua subterránea del acuífero San Diego en el período 2015-2018
4. Analizar la influencia de los constituyentes hidro-geoquímicos del acuífero San Diego sobre el uso sustentable del agua del mismo.

Justificación.

El problema planteado forma parte de una situación cada día más crítica del abastecimiento de agua en la región centro – norte de Venezuela y sus núcleos urbanos. Esta región cuenta con importantes obras de abastecimiento de agua con fuentes superficiales, pero estos sistemas evidencian interrupciones del servicio, racionamiento, insuficiencia, calidad objetable del agua y deterioro de sus instalaciones. En el caso de la zona de San Diego, el suministro del agua por la empresa Hidrológica con el Sistema Regional del Centro sufre de esas condiciones negativas. Sumando el hecho de que la población servida por este sistema (más de 140.000 habitantes) crece sostenidamente, los problemas tienden a aumentar con el paso del tiempo.

Los acuíferos representan un recurso natural vulnerable con una dinámica compleja, difícil de caracterizar. Es por ello que un manejo sostenible respecto a su conservación, explotación racional programada en función de las reservas y la recarga existente, es de vital importancia para obtener los beneficios deseados sin perjudicar la riqueza natural que este recurso representa. Así, la investigación de las fuentes de agua subterráneas en esta zona de San Diego con un análisis apropiado, aportará datos que servirán de base para planificar su extracción en el contexto de su uso sustentable.

Este trabajo está enmarcado en una línea de investigación del Departamento de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo, la cual ha originado numerosos trabajos tanto de pre-grado como de post-grado, siendo de un elevado interés por parte de la institución.

Delimitación del trabajo.

El trabajo a realizar se enfoca en el área del acuífero de San Diego, limitado al área geográfica del municipio San Diego, estado Carabobo. Es decir, el análisis y aplicación de la información disponible se dirige a esta parte del ámbito geográfico del acuífero, considerando que la parte sur del mismo está ubicada en otro municipio, Los Guayos. Esto es debido a que los análisis de población actual y futura así como de cifras de consumo de agua potable se limitaron al municipio San Diego, excluyendo la población y actividades industriales y agrícolas del municipio Los Guayos.

Los datos utilizados para el análisis de las variables se limitan a la recopilación de información documental sobre investigaciones del período 2015 a 2018.

Se especifica además, que el análisis y aplicación de los datos reunidos se enfocan en el uso del agua para el abastecimiento urbano, tipo doméstico, comercial e industrial, dejando por fuera el estudio del uso agrícola, debido a la carencia de información específica en este último aspecto.

Las recomendaciones que se plantean al final son de tipo conceptual, ofreciendo criterios que deben ser tomados en cuenta, sin que este trabajo formule diseños de proyecto factible.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Antecedentes de la Investigación

Segura J. y Rodríguez M. (2017) desarrollan el trabajo “Estimación de los parámetros hidro-geoquímicos del acuífero de San Diego, caso período lluvioso 2017”, donde se llevan a cabo mediciones en tres pozos profundos en San Diego centro. Las mediciones fueron de caudal, nivel estático, nivel de bombeo, parámetros físico químicos (pH, dureza, sólidos disueltos, NMP coliformes). Con los datos de caudales y niveles se calculó la transmisividad del acuífero en el sector. Este trabajo es fundamental para el procesamiento de los datos con métodos geoestadísticos para configurar las características del acuífero de San Diego.

Cordero. P. Johana. C. y Jiménez. R. Marilyn. J. (2017) elaboran “Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del Municipio San Diego durante 2017, caso: Sector Norte”. Para determinar la transmisividad del acuífero y otras características, llevan a cabo en tres pozos profundos mediciones de caudal, toma de muestras y análisis de estos datos. Este trabajo es fundamental para el procesamiento de los datos con métodos geoestadísticos para configurar las características del acuífero de San Diego

Quintero G. y Romero M. (2017) realizan la “Evaluación del proceso de descarga – recarga del acuífero, Municipio San Diego del Estado Carabobo”. Trabajo que tiene por finalidad determinar parámetros del balance hidrológico de la cuenca del acuífero de San Diego, incluyendo precipitación, extracción del agua subterránea, estimación de evapotranspiración. Adicionalmente se

investigaron parámetros físico-químicos del agua subterránea proveniente de varios pozos profundos según registros del Ministerio de Ecosocialismo y Aguas. Estos datos son utilizados en el presente trabajo.

Lesser Carrillo, Juan Lesser Illades, Santiago Arellano Islas y David González Posadas (2011): presentan un artículo en la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas titulado “Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del valle del Mezquital, México Central”. Este trabajo muestra un estudio documental y de campo muy completo sobre dicho acuífero, tanto en sus componentes hidrogeológicos como de calidad del agua. Aquí son de interés el análisis por medio de los datos para calcular el balance hidrológico del agua subterránea y por otro lado el análisis de su calidad, encontrando que hay parámetros que exceden lo permitido para su uso en consumo doméstico, debido a que una de las fuentes de recarga es el agua residual sin tratar de la Ciudad de México.

Llamas R. y colaboradores (2000), son autores de la publicación “El uso sostenible de las aguas subterráneas”. En este trabajo los autores explican los conceptos fundamentales de la explotación de las aguas subterráneas, analizan el término *sobreexplotación*, algunos mitos sobre su uso, así como otros aspectos de planificación, organización, educación de los usuarios, sobre su gestión, y finalmente exponen algunas ideas para lograr el uso sostenible de este recurso. Estas ideas se consideran en el análisis y evaluación de los resultados de esta investigación.

Bases Teóricas

El presente trabajo de investigación se ubica en el área de la ingeniería hidráulica y ambiental, dentro del contexto del estudio de las aguas subterráneas y de aprovechamiento de agua para abastecimiento urbano.

Se considera necesario definir en primer lugar los términos utilizados en el título del trabajo. Los constituyentes hidro – geoquímicos corresponden a los parámetros propios del agua subterránea de tipo hidráulico, físico y químico. Su balance se refiere a la relación de sus volúmenes en períodos determinados de tiempo. La utilidad práctica de esta información se ha enfocado en el uso urbano del agua subterránea, pero considerando que tal uso sea sustentable en el tiempo. De aquí se definen los principales conceptos involucrados en el trabajo.

Acuífero.

Es una formación geológica que está saturada de agua y que puede movilizarla con relativa rapidez, haciendo posible extraerla en términos económicos razonables (Bolinaga et al., 1999).



Figura 3. Acuíferos. (Collazo C., 2012, Manual de agua subterránea)

Las formaciones geológicas que pueden formar acuíferos son muy diversas. Las formaciones que contienen acuíferos están constituidas por materiales no consolidados como las arenas, gravas y sus combinaciones. Su origen geológico puede ser diverso: fluvial, deltaico, depósitos de gravedad (piedemonte), depósitos eólicos (dunas), depósitos glaciares (Díaz D. et al, 2005).

Acuitardos.

Son estratos capaces de almacenar agua pero que la transmiten con dificultad, llamándose también formaciones semi-permeables (González de Vallejo, 2004) como son los limos, arenas limosas, arenas arcillosas.

Acuicludos.

Son formaciones que almacenan grandes cantidades de agua pero que no pueden transmitirla, se drenan con mucha dificultad (González de Vallejo, 2004) como las arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos. En la práctica de pozos profundos se consideran como impermeables.

Acuífero libre.

Son aquellos en los cuales su límite superior está a la presión atmosférica, a consecuencia de limitarse superiormente por estratos permeables.

Acuífero semi-confinado.

Son acuíferos limitados superior e inferiormente por estratos semi-permeables o acuitardos, existiendo sobre el estrato confinante superior un acuífero bien alimentado.

Acuífero confinado.

Se encuentran rodeados en el subsuelo tanto por arriba como por abajo por materiales impermeables. Debido al peso de las capas superiores, su límite superior se encuentra a presión superior a la atmosférica.

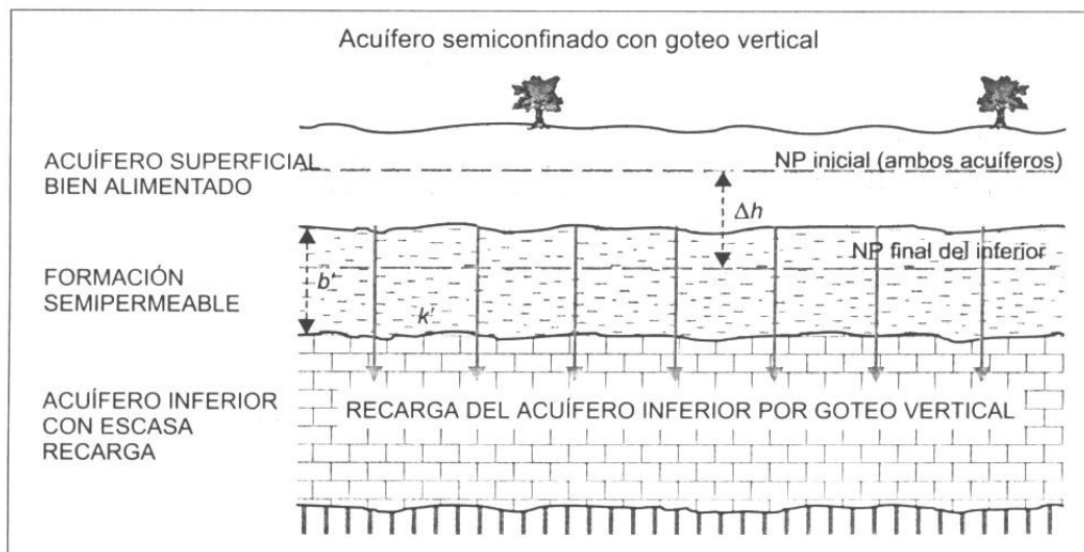


Figura 4. Esquema de un acuífero semi-confinado. (Según González de V., 2002).
NP: nivel piezométrico.

Se debe señalar que la condición de confinamiento de un estrato acuífero puede no ser absoluta ni uniforme en toda su extensión, sino que se basa en su observación vertical en un sitio específico. Generalmente, esos estratos afloran en algún extremo, pudiendo ocurrir allí un área de recarga ya que no tiene aislamiento en su parte superior (ver figura 5).

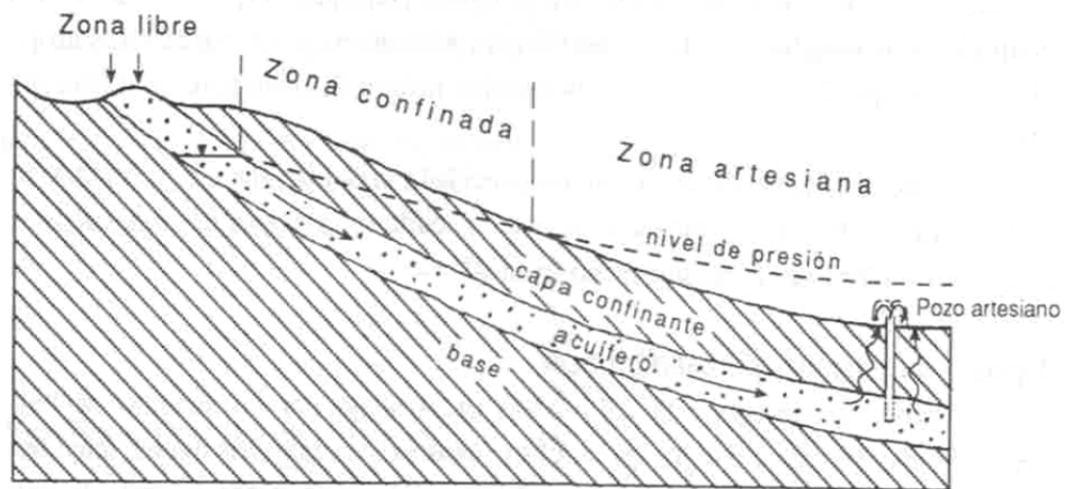


Figura 5 . Acuífero con zona confinada, zona confinada artesisiana y zona libre de recarga (Werner, 1996).

Porosidad y porosidad efectiva.

Porosidad es la relación entre el volumen vacío de una porción de suelo y el volumen total del mismo. Se expresa en porcentaje o en decimales, con valores en el intervalo de 0 a 1.

La porosidad efectiva también se conoce como porosidad eficaz, es el porcentaje de la porosidad total que puede ser drenado por gravedad de un volumen de suelo saturado. Se expresa en porcentaje % o en decimales entre 0 y 1.

Permeabilidad.

Es la facilidad con que puede pasar un caudal de agua por un medio poroso. Se define técnicamente también como conductividad hidráulica K , según la expresión, donde A es el área de la sección del flujo:

$$Q = K \cdot A \cdot \text{gradiente hidráulico} = K \cdot A \cdot (\Delta h/L) \quad (1)$$

Valores normales de K en terrenos naturales (m/día)	
Grava limpia	1000
Arena gruesa limpia	1000 a 10
Arena fina	5 a 1
Arena limosa	2 a 0,1
Limo	0,5 a 0,001
Arcilla	<0,001

Figura 6. Valores de permeabilidad t picos de diferentes terrenos naturales (Custodio y Llamas 1983, citado por Collazo C., 2012).

Coeficiente de almacenamiento S.

Es la proporción entre el volumen de agua liberado y el volumen total de descenso del nivel piezométrico. (Padilla, 2012).

$$S = \frac{\text{volumen de agua (m}^3\text{)}}{\text{unidad de superficie (m}^2\text{) x unidad de cambio de nivel (m)}} \quad (2)$$

El coeficiente de almacenamiento es adimensional, siendo algunos valores t picos de 10^{-3} a 10^{-4} en ac feros semi-confinados, y de 10^{-4} a 10^{-5} en ac feros confinados (Sánchez S.R, 2014).

Transmisividad T.

Es el parámetro que resulta de multiplicar la conductividad hidráulica por el espesor H del medio por donde ocurre el flujo.

$$T = K \cdot H \text{ [m}^2\text{/s]}, \quad (3)$$

Nivel freático.

También se dice superficie freática, es la superficie formada por los puntos saturados con una presión igual a la atmosférica.

Infiltración y recarga.

La infiltración es el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el sub-suelo. No sólo el agua de precipitación realiza el proceso de infiltración, también bajo ciertas condiciones de gradiente hidráulico, el agua de las corrientes superficiales se infiltra hacia el sub-suelo.

Pozo profundo.

Es una estructura de captación de aguas subterráneas que consiste en una perforación vertical excavada en el terreno, cuya profundidad será generalmente mayor a 10 m para penetrar en el acuífero. Esta perforación generalmente posee una tubería interna, llamada tubería de forro, que permite tanto soportar el posible derrumbe del terreno como permitir a través de ranuras el ingreso del agua subterránea al pozo, para desde allí extraerla por medios mecánicos.

Litología del pozo profundo.

Es la clasificación de los tipos de suelos o materiales extraídos a lo largo de la perforación. Usualmente se utiliza el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS (en inglés: Unified Soil Classification System, USCS) de acuerdo a la granulometría que posee: arcillas, limos, arenas, gravas, rocas, y sus combinaciones, y al grado de plasticidad de una muestra húmeda. También se puede indicar para cada estrato su composición mineral. De esta manera se

caracteriza el tipo de estrato encontrado a distintas profundidades, incluyendo el espesor del mismo.

SISTEMA CLASIFICACION USCS						
GRUESOS (< 50 % pasa 0.08 mm)						
Tipo de Suelo	Símbolo	% pasa 5 mm.***	% pasa 0.08 mm.	CU	CC	** IP
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3	
	GP			≤ 6	<1 ó >3	
	GM		> 12			< 0.73 (w _L -20) ó <4
	GC					> 0.73 (w _L -20) ó >7
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3	
	SP			≤ 6	<1 ó >3	
	SM		> 12			< 0.73 (w _L -20) ó <4
	SC					> 0.73 (w _L -20) y >7
* Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM,SW-SM, SP-SC. *** respecto a la fracción retenida en el tamiz 0.080 mm						
FINOS (≥ 50 % pasa 0.08 mm)						
Tipo de Suelo	Símbolo	Lim. Liq. w _L	Índice de Plasticidad * I _P			
limos inorgánicos	ML	< 50	< 0.73 (w _L - 20) ó < 4			
	MH	> 50	< 0.73 (w _L - 20)			
arcillas inorgánicas	CL	< 50	> 0.73 (w _L - 20) y > 7			
	CH	> 50	> 0.73 (w _L - 20)			
limos y arcillas orgánicos	OL	< 50	** w _L seco al horno ≤ 75 % de w _L seco al aire			
	OH	> 50				
turba	P _t	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente.				

Figura 7. Clasificación de suelos gruesos y finos por el USCS usado en ingeniería (tomado de: <https://civilgeeks.com/2015/07/11/apuntes-del-sistema-unificado-de-clasificacion-de-suelos-s-u-c-s/>)

El sistema unificado considera los suelos finos divididos en tres grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicos (O).

Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez, según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es $LI = 50\%$. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (Lowcompresibilidad). Si es mayor de 50 se añade la letra H (High compresibilidad) obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

ML = Limos inorgánicos de baja compresibilidad.

OL = Limos y arcillas orgánicas de baja compresibilidad.

CL = Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.

CH = Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.

MH = Limos orgánicos de alta compresibilidad.

OH = Arcillas y limos orgánicos de alta compresibilidad.

También se utiliza el término O o VL ("vegetal layer") que se refiere a la capa orgánica o capa vegetal superior del suelo natural y R para estrato de roca.

Nivel estático.

Es el nivel que presenta el agua en un pozo profundo mientras que no se le extraiga agua por bombeo. El nivel estático coincide con el nivel freático en los acuíferos libres, mientras que en los confinados corresponde al nivel piezométrico. Por otro lado, existe el nivel de bombeo o nivel dinámico, que es el que ocurre cuando se realiza extracción de agua del pozo.

Balance hidrogeológico.

Para un sistema hidrogeológico bien definido, sin influencias externas a la cuenca en la cual se encuentra, se puede establecer un balance de agua según la ecuación siguiente:

Entradas – Salidas = Cambio de Almacenamiento (Werner J., 1996)

$$P - (ET + R + G) = \Delta S \quad (2.4)$$

Donde P es precipitación, ET es evapotranspiración, R es el escurrimiento superficial, G es el escurrimiento subterráneo y S el almacenamiento en el sistema. A su vez, la precipitación se puede relacionar con los otros parámetros:

$$P = ET + R + I \quad (2.5)$$

Donde I es la infiltración, parámetro muy importante porque se relaciona con la recarga de los acuíferos.

La capacidad de almacenamiento total S del sistema comprende el que ocurre en la superficie, más la zona aireada del suelo mientras transcurre la infiltración, sumado al almacenamiento en los acuíferos.

El balance hídrico es un aspecto fundamental en el ámbito de la gestión del agua subterránea como fuente de abastecimiento. La recarga es componente principal que incidirá en la disponibilidad del agua subterránea (Bolinaga, 1999). Este autor refiere que la aplicación de esas fórmulas de balance no es algo simple, ya que requiere de una gran cantidad de información difícil de determinar.

Calidad del agua subterránea (para abastecimiento).

El aspecto de la calidad del agua subterránea, su caracterización físico – química y microbiológica permite clasificarla para decidir sobre sus condiciones para el consumo humano, agrícola o industrial, y posibles necesidades de tratamiento. Algunas características físico-químicas y

microbiológicas del agua potable se definen a continuación, dado que corresponden a los constituyentes a que se refiere el objetivo de este trabajo.

El agua destinada para el consumo humano debe presentar características físicas, químicas y biológicas, que no perjudiquen su salud. Para ello se establecen normas de potabilidad, donde se indican las concentraciones deseables y máximas admitidas de un conjunto de parámetros que son los que definen tales características (Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable, 1998). Algunos parámetros que debe poseer el agua para que sea potable según la norma vigente en Venezuela: a) turbiedad de 0 hasta 5 UNT, b) sólidos disueltos totales SDT máximo 1.000 mg/L, c) dureza total máximo 500 mg/L, d) pH entre 6,5 y 8.

Sólidos Disueltos.

Corresponden a la diferencia entre los sólidos totales del agua y los sólidos en suspensión de la muestra filtrada. Se expresan en mg/L. Para las aguas subterráneas, los sólidos disueltos están formados principalmente por compuestos inorgánicos como carbonatos, sulfatos, especies iónicas de Ca, Mg, Na, Cl, Fe, etc., provenientes de la disolución en los estratos que ocupan.

Conductividad.

Es el inverso de resistividad, la facilidad con que un medio acuoso conduce carga eléctrica. Este parámetro es una medida indirecta de la presencia de sustancias minerales disueltas.

A continuación se muestran (Werner, 1996) las conductividades eléctricas de algunos tipos de agua. Su unidad es el micro-mho/cm, donde el

mho es el inverso de la unidad de resistencia Ohm, y actualmente se denomina micro-Siemens/cm [$\mu\text{S}/\text{cm}$]:

- Agua de lluvia 5-30 [$\mu\text{mhos}/\text{cm}$]
- Agua subterránea dulce (potable) 30 – 2.000
- Agua de mar 45.000 – 55.000
- Salmueras hasta > 100.000

Nitratos.

Los compuestos de nitrógeno llamados nitratos tienen la fórmula NO_3 siendo ésta la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en el medio. Su importancia radica en que su principal procedencia es de la descomposición y estabilización de materia orgánica de desecho, siendo un indicador de posible contaminación de las fuentes de agua por residuos cloacales u orgánicos.

Dureza.

Es la capacidad del agua de impedir la producción de espuma, una forma la presencia en el agua de cationes metálicos como los de calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}) principalmente. Aunque no resultan tóxicos para el consumo humano en las concentraciones comunes, sí son perjudiciales para el uso de jabones, o en el caso del agua de procesos industriales que no deben formar precipitados insolubles que pueden obstruir tuberías y otras instalaciones.

El análisis químico del agua subterránea se puede presentar en un nivel básico con el reporte de concentración de algunos elementos, compuestos o iones en el agua. Pero en un nivel más detallado, la química del agua natural debe ser estudiada considerando que las sustancias presentes son una parte de equilibrios de especies iónicas (aniones y cationes) de distintos elementos,

por lo que se pueden utilizar diversas representaciones gráficas para mostrar dicha composición como un conjunto integrado. Así se dispone de diagramas de barras, diagramas triangulares de Piper, y diagramas de Stiff, entre otros.

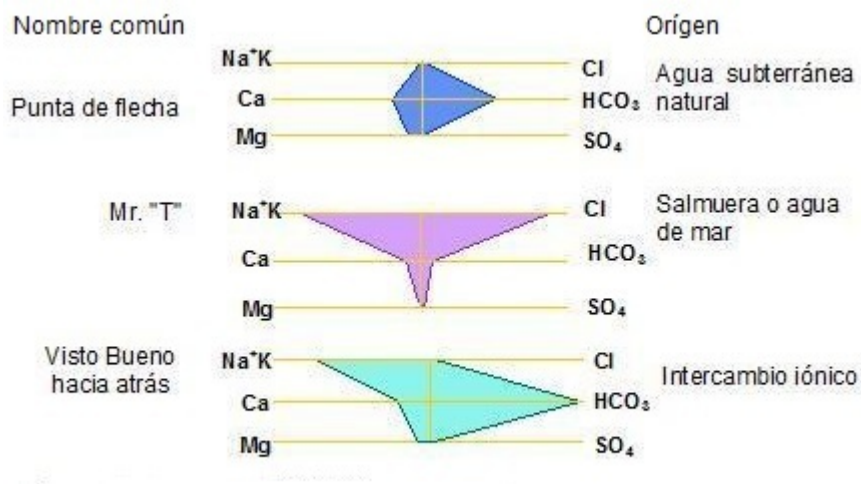


Figura 8. Ejemplos de diagramas de Stiff de tres muestras de agua. (De: <https://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>)

Número más probable de Coliformes (NMP).

Es el valor que se obtiene de cultivos con muestras del agua, estimando la cantidad más probable de microorganismos individuales por cada 100 mL de acuerdo a las muestras que resulten positivas en la formación de colonias de bacterias del grupo coliforme. Este es un ensayo que permite descartar la presencia de microorganismos patógenos en el agua, ya que las bacterias del grupo coliforme son comunes en materias de desecho y excretas, siendo más resistentes que la mayoría de las bacterias patógenas, por lo que su ausencia implica igualmente la ausencia de las patógenas.

Gestión integrada de los recursos hídricos GIRH.

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) se define como un proceso que promueve el desarrollo y gestión coordinados del agua, la tierra y los recursos conexos para maximizar el bienestar económico y social resultante de forma equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales. (Care Internacional, 2012). Se entiende por *recursos hídricos*, los caudales de agua circulantes en el sistema durante un periodo de tiempo determinado. Normalmente se utiliza una base anual, con lo que los diferentes componentes de Ciclo hidrológico se establecen como caudales medios anuales. La GIRH procura incluir la participación de todos los actores involucrados: comunidades, empresas, gobierno local y nacional, instituciones no gubernamentales, etc. Este concepto tan amplio es invocado en diversos ámbitos, como por ejemplo en la legislación de materia ambiental de Venezuela y otros países, pero realmente se observa la ausencia de hechos concretos que muestren su aplicación.

Uso conjunto del agua.

Se dice que hay uso conjunto cuando la demanda de un acueducto puede ser satisfecha ya sea desde una fuente superficial o de una subterránea (Rocha F., 1993), utilizando en mayor proporción la fuente superficial cuando esta lo permite, o la fuente subterránea cuando disminuye la disponibilidad de la fuente superficial. El uso combinado de aguas superficiales y subterráneas se realiza en muchos sitios desde hace años (Llamas R. et al, 2012), en Europa y en Norte América, en donde las fuentes superficiales son relativamente escasas. También se aplica en lugares que sufren importantes disminuciones durante la temporada de sequía, como explica Rocha F. (1993) en Lima, Perú. Para el caso de San Diego implica que el suministro al

acueducto se realice coordinadamente con los aportes del sistema de abastecimiento proveniente del Sistema Regional del Centro (SRC) más el agua proveniente de las fuentes subterráneas, las cuales van a cubrir el déficit existente en el SRC.

Disponibilidad del recurso agua (recurso hídrico).

Es un parámetro utilizado en la planificación y gestión del agua, donde se mide el volumen de agua disponible en las fuentes por número de habitantes; generalmente se expresa en $\text{m}^3/\text{año-habitante}$. Va en función de la cantidad, la calidad y el acceso que se tiene hoy y el que se tendrá a futuro (CARE Int., 2012). La cantidad, la calidad y el acceso se miden de acuerdo con períodos o estaciones (temporadas de sequía o estiaje, por ejemplo), pero también respecto a la zona geográfica de la que se trata. Por eso se trata de un parámetro muy variable.

Para las aguas subterráneas se pueden calcular en forma aproximada los volúmenes disponibles en el acuífero mediante la determinación de la extensión y espesor de los mismos, y de su porosidad efectiva y coeficiente de almacenamiento S . El valor obtenido representa el volumen que teóricamente podría extraerse, sin considerar otros factores como las condiciones de confinamiento que puedan tener los acuíferos. Las estimaciones de disponibilidad implican un grado de inseguridad, aun disponiendo de buena información (Bolinaga, 1999). Es por ello que todo aprovechamiento de aguas subterráneas debe hacerse paulatinamente, al ser monitoreado se irá determinando su rendimiento seguro.

Uso sustentable del agua.

En primer lugar, un determinado proceso es “sostenible” cuando puede mantener a través del tiempo el uso de recursos naturales renovables sin agotarlos o dañarlos irreversiblemente; por lo tanto, en el contexto del medio ambiente implica procesos respetuosos con el mismo. El término “sustentable” se considera sinónimo de sostenible, siendo un concepto difícil de definir con aplicabilidad universal. Para el campo del uso del agua subterránea, se seguirá el concepto de USGS (USGS Circular 1186, 1999) de que es extraer este recurso de manera que pueda realizarse por tiempo indefinido sin causar consecuencias inaceptables al ambiente, a la economía o a la sociedad.

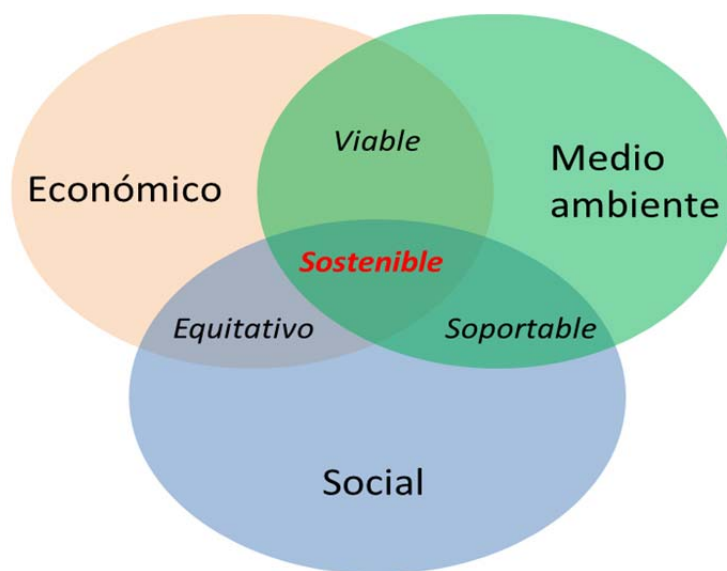


Figura 9. Dimensiones de la sostenibilidad de una actividad o proceso.

En un nivel general, el desarrollo sustentable considera los factores de protección ambiental, equidad social y factibilidad económica (ver figura 9), para concebir e implantar modelos de producción y consumo que no perjudiquen los recursos naturales de los que dependen, que satisfagan

equitativamente las necesidades de la población general actual y futura (Masters, 2008), añadiendo, que sea económicamente factible y rentable.

En cuanto al agua subterránea en el área de estudio del presente trabajo, se parte de la premisa que es un recurso natural renovable, ya que la cuenca de San Diego presenta aportes de agua por precipitación y se estima que una porción se convierte finalmente en agua subterránea.

Los elementos o indicadores de sustentabilidad del uso del agua subterránea serán los siguientes:

- a) disponibilidad del recurso hídrico
- b) planificación del abastecimiento a través de la GIRH
- c) tasa de extracción y rendimiento seguro
- d) calidad del agua
- e) protección del suelo y zonas de recarga del acuífero

La disponibilidad como recurso hídrico o fuente de abastecimiento ya ha sido definida antes.

Las estrategias y políticas de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) comprenden definir y diseñar a nivel general el sistema de abastecimiento de agua potable o de riego en un área determinada, en función del uso conjunto de las fuentes disponibles, de las proyecciones de población, crecimiento urbano, industrial o agrícola, usos de la tierra y ordenamiento urbano.

La tasa de extracción y rendimiento seguro de los acuíferos, son términos utilizados en el medio de la hidrogeología (Johnson, 1974), y es justamente el

concepto de que este recurso, situado en una parte del ciclo hidrológico, debería extraerse a una tasa que no exceda su reposición natural (recarga) o de lo contrario se agotará o se verá seriamente afectado en sus condiciones normales para extracción. Sin embargo, el movimiento del agua subterránea puede ser tan lento que los cambios de volumen pueden notarse al cabo de años o décadas.

La calidad del agua, subterránea, en el contexto de su uso para abastecimiento urbano, es un factor que interviene en la sustentabilidad, ya que una calidad apta para consumo permite tal uso con un costo básico al no requerir de sistemas de tratamiento, pero si su calidad es inferior y necesita de tratamientos de potabilización, se incrementa el costo pudiendo dejar de ser rentable.

Geoestadística.

Es la parte de la estadística especializada en el análisis e interpretación de datos espaciales de la Tierra referenciados geográficamente (Hengl T., 2007). Se relaciona con los sistemas de información geográfica, ya que éstos pueden proveer los datos que se analizan.

En la geoestadística interesa estudiar: a) cómo varía un parámetro en el espacio y el tiempo, b) cuántas muestras o datos se necesitan para representar la variabilidad de un parámetro, c) qué valor tendrá ese parámetro en un sitio distinto al de las muestras. Como consecuencia del análisis espacio – temporal de los datos, se llega a disponer de mapas que muestran el comportamiento o tendencia de un parámetro, Por lo tanto, su objetivo principal consiste en estimar valores desconocidos a partir de los conocidos, buscando minimizar la variable en el error de estimación.

Bases Legales

Siguiendo un orden de jerarquía, las bases legales que tienen relación con este trabajo son las siguientes:

1. Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. Capítulo IX “De los Derechos Ambientales”
2. Ley Orgánica del Ambiente (2006)
3. Ley de Aguas (2007)
4. Decreto Nro. 2.048 (1997) sobre Normas para pozos perforados para abastecimiento
5. Decreto Nro. 964 (2000) “Plan de Ordenamiento y Reglamento de Uso del Área Crítica con Prioridad de Tratamiento de la Cuenca del Lago de Valencia”
6. Normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la cuenca del Lago de Valencia (decreto 3.219 de 1999)
7. Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable (Gaceta Oficial Nro. 36.395, 1998)

Para el desarrollo de los objetivos planteados se destacan los artículos de dicha legislación que inciden en distintos aspectos del presente trabajo, principalmente lo relacionado con la gestión sustentable del recurso y con la calidad de las aguas.

Luego de la orientación general que surge de los artículos 127, 128 y 129 de la Constitución, la Ley Orgánica del Ambiente va ampliando y definiendo una serie de aspectos fundamentales sobre gestión integral del agua y su control de calidad.

Es pertinente citar a Bolinaga (1999), “Todo lo conducente al uso del agua debe estar enmarcado en una política hidráulica cuyo instrumento de definición más importante es una ley de aguas... el establecimiento de las reglas y normas del uso del agua, tanto en lo que se refiere a la cantidad como a la calidad.”

En el año 2007 se promulga en Venezuela la Ley de Aguas, para “establecer las disposiciones que rigen la gestión integral de las aguas...”. Respecto a esta ley, se sustenta legalmente la extracción del agua de diversas fuentes, en este caso subterránea, para abastecimiento público siempre que se ajusten al balance de disponibilidades y demandas de la fuente correspondiente (artículo 11). En general, a lo largo de este texto legal se observa la intención de que las actividades relacionadas con los usos del agua se enmarquen en políticas de gestión integral del recurso y su conservación.

En cuanto a la calidad del agua, están vigentes las “Normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la cuenca del Lago de Valencia”, correspondientes al decreto 3.219 de 1999, las cuales aplican para la sub-cuenca del río San Diego – Los Guayos.

En esta norma se fijan límites para clasificar el agua de la cuenca (superficial o subterránea) según su calidad y potencial para diversos usos, indicando el grado de tratamiento que requiere para el uso que se haya determinado.

Las aguas tipo 1 son aquellas (aguas naturales) destinadas al uso doméstico o industrial que necesiten de agua potable. Este tipo 1 se subdivide en tipo 1^a, 1B y 1C, donde el tipo 1^a es aquella agua natural de tan alta calidad

desde el punto de vista sanitario que pueden usarse directamente en acueductos con sólo su desinfección.

Tabla 1. Características de las aguas clasificadas como Tipo 1A

Parámetro	Límite o rango
Oxígeno disuelto OD (mg/L)	4,0
pH	Entre 6,0 y 8,5
Color real (unidades de Pt-Co)	< 50
Turbiedad (UNT)	< 25
Coliformes totales (NMP en 100 mL)	< 2.000 promedio mensual
Fluoruros (mg/L)	< 1,7
Dureza (mg/L como CaCO ₃)	< 500
Clorofila (µg/L)	< 12 microgramos/Litro
Cloruros (mg/L)	< 600
Sólidos disueltos totales (mg/L)	< 1.500
Sulfatos (mg/L)	< 400

Según Decreto 3.219 de 1.999, Normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la Cuenca del Lago de Valencia

Los artículos 7 y 8 de estas normas establecen los criterios y parámetros que definen el nivel de calidad del agua de cualquier componente natural de dicha cuenca, incluyendo las aguas subterráneas.

Cabe señalar que respecto a la calidad del agua para consumo humano, existen las “Normas de Calidad del Agua Potable” (Gaceta Oficial Nro. 36.395,

1998), donde se norman los principales parámetros que se deben considerar en el análisis agua para que sea potable. Este nivel de calidad aplicará a aguas ya tratadas para consumo humano, por lo tanto difiere del objetivo del presente trabajo en cuanto a la calidad del agua subterránea (cruda), pero en determinados casos se cita como referencia.

Marco referencial o geográfico

El área de estudio corresponde a la cuenca del río de San Diego y Los Guayos, la cual está limitada por las coordenadas N 10°22'00" a N 10°09'00" y longitud Oeste 67°52'00" a O 68°00'00". Es una sub-cuenca de la del Lago de Valencia (Figura 12).

Localizado en el centro del estado Carabobo, en la región centro – norte – costera de Venezuela, comprende uno de los valles que posee la Cordillera de la Costa entre su vertiente norte y el Lago de Valencia. Limita por el norte con el municipio Puerto Cabello, por el este con el valle de Vigirima y planicies del lago de Valencia del municipio Guacara, por el oeste con el municipio Valencia, y por el sur con el municipio Los Guayos.

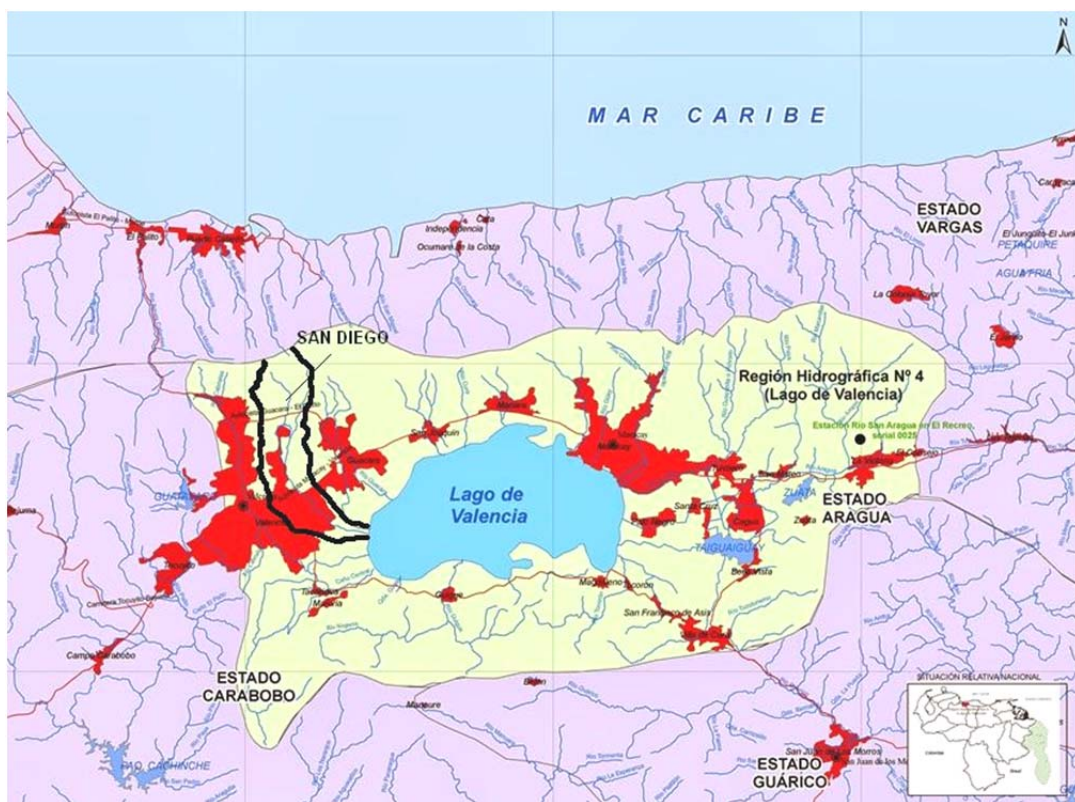


Figura 10. Cuenca del Lago de Valencia.

(De: <http://petiongeografiadevenezuela.blogspot.com/2014/05/cuencas-hidrograficas-nacionales.html>)

Definiendo las líneas divisorias de la cuenca, se elabora el mapa del área de la misma, resultando una superficie de 117 Km². Comprende elevaciones desde 416 m.s.n.m. al sur, hasta 1.260 m.s.n.m al norte en su límite montañoso. Posee un cauce principal orientado del norte al sur y sur-este conocido como el río San Diego y río Los Guayos, según se encuentre en su tramo norte o en su tramo sur-este. Dicho cauce desemboca en el Lago de Valencia, cerca del sector conocido como Isla La Culebra.

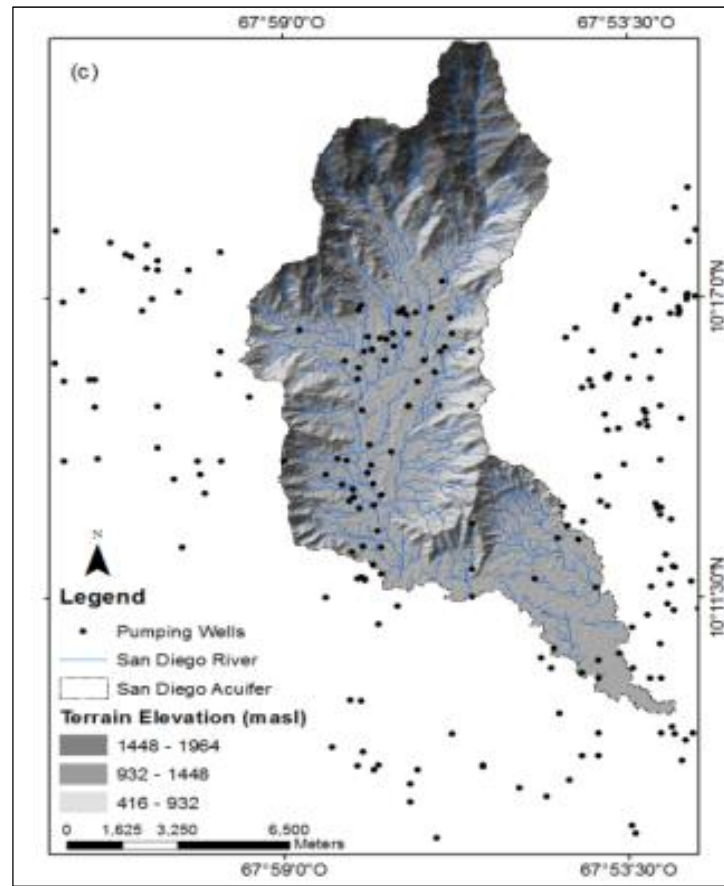


Figura 11. Area del acuífero de San Diego con ubicación de los pozos profundos de la zona. (Márquez, 2018)

Desde el punto de vista hidrológico y de acuerdo a la definición de acuífero, el de San Diego corresponde al conjunto de estratos geológicos del sub-suelo ubicados dentro del límite de su cuenca, cuyas propiedades físicas les permiten la capacidad de almacenar agua y de conducirla a las obras de captación que son los pozos profundos.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Nivel de la investigación

Este trabajo está planteado bajo el nivel de investigación descriptiva, con modalidad de estudio de campo. Así es ya que los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades importantes de grupos o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis (Danke, 1986, citado por Hernández S., 1998). Miden o evalúan ciertos aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno a investigar.

De esta manera, el presente trabajo utiliza la información proveniente de diversos estudios previos para describir las características principales del acuífero estudiado, su comportamiento y un balance de constituyentes (parámetros) hidrogeológicos. Además, se utilizan los resultados obtenidos para llevar a cabo una evaluación de su incidencia en la sustentabilidad del uso del agua subterránea para abastecimiento en el área de estudio. Este último paso se plantea más allá del nivel descriptivo básico, respondiendo la cuestión de si es sustentable o en qué medida puede ser ese proceso.

3.2 Diseño de la investigación

El presente trabajo corresponde básicamente a un diseño de tipo documental. Los datos que se analizan e interpretan se basan en un diseño no experimental de tipo longitudinal, debido a que en las actividades de caracterización las variables se han medido a través del tiempo en el período de estudio de varios años. Posteriormente, los resultados del conjunto de

investigaciones de campo son sometidos a un análisis cuantitativo que permite especificar propiedades del objeto de estudio, el acuífero de San Diego, para luego realizar una interpretación contra los parámetros de uso sustentable del agua como recurso y con ello decidir cualitativamente si es cierto o no lo es.

En este caso, las mediciones de campo fueron realizadas en diversos trabajos de investigación (ver referencias), y de ellos se obtiene un conjunto de datos utilizados para la caracterización y análisis.

Es importante aclarar que aunque las investigaciones tipo documental básicas no implican técnicas de recolección de datos en campo, en este trabajo se explican las principales técnicas utilizadas en los trabajos de referencia utilizados.

3.3 Unidad y variables de investigación

En este trabajo la unidad de investigación es el acuífero de San Diego, relacionado con la cuenca hidrográfica delimitada del río San Diego – Los Guayos, específicamente en el límite político del municipio San Diego. Se trata entonces de un ente físico-ambiental que comprende, entre otros elementos, volúmenes de agua subterránea que va a ser estudiada y caracterizada. El acuífero además es un ente funcional, que presenta un comportamiento hidráulico que también se requiere estudiar y que depende en gran parte de la hidrología de la cuenca.

En ambos casos, el principal medio para llevar a cabo tales estudios es el conjunto de pozos profundos. Los pozos profundos son obras de captación que permiten obtener información sobre los acuíferos y el agua subterránea.

Por consiguiente, los pozos profundos no son en sí variables de investigación, pero a través de ellos se obtienen las variables que permiten responder los objetivos planteados.

Con base en lo expuesto en el marco teórico, las variables de la investigación son:

- Variables de caracterización del agua: parámetros de calidad del agua
- Variables hidro-geológicas:
 - Litología del subsuelo
 - Nivel estático y dinámico en el pozo
 - Parámetros de almacenamiento y flujo subterráneo (permeabilidad, transmisividad)
 - Parámetros hidro-meteorológicos: precipitación, evaporación, infiltración, caudales extraídos por bombeo

3.4 Población y muestra

El muestreo desarrollado en este estudio fue del tipo probabilístico por racimos (Hernández-Sampieri et al., 2014), según el cual las unidades se encuentran encapsuladas en determinados lugares físicos. Muestrear por racimos implica diferenciar entre la unidad de análisis y la unidad muestral. La unidad de análisis indica quiénes van a ser medidos. La unidad muestral (en este tipo de muestra) se refiere al racimo por medio del cual se logra el acceso a la unidad de análisis.

En este estudio, la unidad de análisis estuvo constituida por los pozos de agua potable registrados por HIDROCENTRO (Figura 12 y Tabla 2, Anexo I), Ministerio de Ecosocialismo y Aguas (MINEA) (Figura 13 y Tabla 3, Anexo II),

y las tesis de pregrado asistidas desde el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC) (Figura 14 y Tabla 4, Anexo I), respectivamente. La unidad muestral puede ser considerada como el administrador de los pozos, HIDROCENTRO, MINEA, así como urbanismos y empresas privadas.

Con respecto a los pozos administrados por la compañía Hidrológica del Centro (HIDROCENTRO C.A.), estos fueron representados en la Figura 12 y descritos en la Tabla 2, donde se incluye la descripción de 24 pozos, en cuanto a ubicación en coordenadas proyectadas en el plano, código de localización asignado por HIDROCENTRO y una referencia del sector dentro del Municipio San Diego donde se encuentran ubicados. El aval de la obtención del inventario de los pozos emitido por la Unidad de Reducción de Agua No Contabilizada (URANC) de HIDROCENTRO para el período 2015-2021 puede ser encontrado en el Anexo I, donde se especifica que la información recibida abarcó (i) codificación de los pozos, (ii) ubicación en coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) y (iii) medición mensual de caudal de bombeo desde cada pozo en la base de datos.

Tabla 2: Componentes del muestreo por racimos para caudal y nivel de agua desde los pozos administrados por la empresa Hidrológica del Centro (HIDROCENTRO) en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo.

Parámetros	Unidad muestral	Unidad de análisis			Localizador	Ubicación
		No	X	Y		
Caudal	HIDROCENTRO	1	613565.98	1129788.15	103094	Morro I
		2	613992.28	1129902.97	103095	Morro II
		3	614200	1131798	103236	Valle de oro
		4	614129	1131248	103244	Valle de oro II
		5	613366.96	1130435.18	103098	Esmeralda I
		6	612589.03	1130935.21	103099	Esmeralda II
		7	613059.61	1130594.9	103168	Esmeralda III
		8	612706.09	1130457.08	103169	Esmeralda IV
		9	614224.23	1134066.32	103219	Monteserino III (Las Casitas)
		10	612914	1136653	103212	La Josefina
		11	614146.35	1134443	103223	Brisas del Valle
		12	615931	1134443	103235	El Polvero
		13	613514	1135119	103096	Crispin (Monteserino I)
		14	613354	1131691	103225	Yuma III
		15	613047	1131677	103226	Esmeralda VI
		16	613459	1133301	103243	Monte Mayor
		17	613423	1129286	103242	Bomberos
		18	613871	1130826	103241	Metropolitano
		19	613833	1135056		TULIPAN I
		20	613730	1135169		TULIPAN II
		21	614118	1135490		TULIPAN III
		22	614058	1135318		TULIPAN IV
		23	613919	1135999		TULIPAN V
		24	613554	1134775		TULIPAN VI

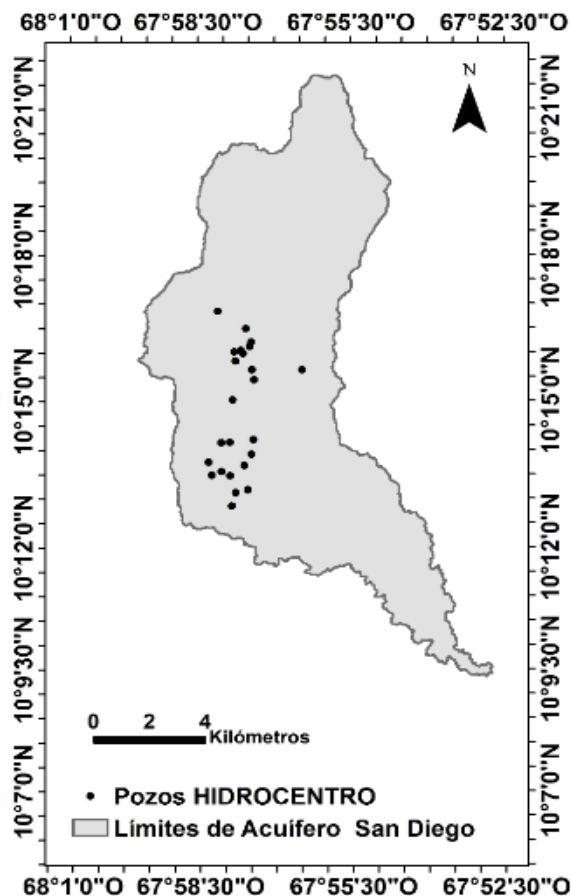


Figura 12: Ubicación de los pozos de muestreo de caudales administrados por la empresa Hidrológica del Centro (HIDROCENTRO) en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

En relación a los pozos administrados por el MINEA dentro del Municipio San Diego, la base de datos fue publicada en Márquez y Carrillo, (2015). En la Tabla 3 y Figura 13 se muestra la ubicación de 38 pozos dentro del Municipio San Diego, especificando la localización en coordenadas UTM, código de localización del MINEA y ubicación indicando el sector y propietario. Una muestra de 5 planillas de registro del inventario de los pozos del acuífero del Municipio San Diego del MINEA se incluyen en el Anexo II.

Tabla 3: Componentes del muestreo por racimos para caudales y niveles de agua desde los pozos administrados por el Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas (MINEA) en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia. Adaptado de Márquez y Carrillo (2015).

Parámetro	Unidad Muestral	Unidad de análisis				Ubicación	Propietario
Caudal y Nivel de agua	MINEA	No	X	Y	Localizador		
		1	616,822.43	1,133,259.93	CA6160171A	El Milagro	MAC
		2	616,840.70	1,127,730.70	CA6160172A	Los Guayos	MSAS
		3	620,502.82	1,124,671.12	CA6260003A	Asent. El Roble	IAN
		4	614,097.70	1,129,042.64	CA6260006A	Los Harales	ACUERUR
		5	614,292.11	1,134,787.54	CA6260058A	Urb. Las Mercedes	Davit Stendel
		6	613,628.22	1,133,095.90	CA6260059A	Club Campestre V34	José Luis Gómez
		7	613,908.00	1,131,253.72	CA6260060A	Hda Yuma san diego-v32	Alberto Yude
		8	613,394.19	1,130,176.94	CA6260061A	Hda Santa Ana-v30	Ernesto Facenda
		9	614,193.74	1,127,568.49	CA6260062A	Hda Castillito-v21	Hermanos Lozano
		10	614,190.77	1,128,490.02	CA6260080A	Hda los arales	Diogenes Chacin
		11	613,673.37	1,128,519.07	CA6260081A	Gja Carolina	Carolina De Covacs
		12	615,753.79	1,134,392.98	CA6260082A	Hda La Caracara	Domingo Jiménez
		13	614,988.86	1,135,711.35	CA6260083A	Hda La Milagrosa	Reina Martínez
		14	614,564.33	1,135,279.91	CA6260084A	Hda San Fco Cupira	Pedro Borbón
		15	615,199.51	1,136,418.56	CA6260085A	Hda Sabana Del Medio	Nicolás Márquez
		16	616,204.08	1,136,237.56	CA6260086A	Hda La Miguelera	Nicolás Márquez
		17	614,682.32	1,136,416.87	CA6260087A	Hda San Rafael	Pedro Aristigueta
		18	614,532.51	1,135,709.86	CA6260088A	Fca Sabana Del Medio	Hermanos Carreno
		19	621,110.65	1,124,918.93	CA6260104A	Los Cerritos	Servicios Banconac
		20	619,481.02	1,129,859.08	CA6260169A	Carretera Nac .Guacara	MARAVEN

Tabla 3 (Cont.): Componentes del muestreo por racimos para caudales y niveles de agua desde los pozos administrados por el Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas (MINEA) en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia. Adaptado de Márquez y Carrillo (2015).

Parámetro	Unidad Muestral	Unidad de análisis				Ubicación	Propietario
Caudal y Nivel de agua	MINEA	No	X	Y	Localizador		
		21	615,879.23	1,133,256.82	CA6260180A	Los Harales	MAC
		22	614,996.88	1,133,253.93	CA6260181A	Santa Anita	IAN
		23	618,667.57	1,127,429.59	CA6260183A	Los Guayos	Pedro A Torres
		24	613,525.95	1,136,505.27	CA6260210A	El Toco Guacara	MAC
		25	613,616.72	1,136,659.15	CA6260216A	La Colmena	MAC
		26	615,448.23	1,134,791.31	CA6260217A	La Lopera	MAC
		27	615,903.59	1,135,099.99	CA6260182A	Fdo. Validar	Diógenes Rodríguez
		28	621,353.60	1,125,073.35	CA6260160A	Mocundito	INOS
		29	613,339.23	1,128,333.69	CA6260162A	Parcelas Aragüita	INOS
		30	620,504.90	1,124,056.76	CA6260165A	Los Cerritos	Malariologia
		31	613,177.26	1,131,404.96	CA6260248A	Mañongo	Pedro Girón
		32	611,351.63	1,131,399.16	CA6260249A	Moñongo	Frantick Stra
		33	616,816.31	1,135,103.01	CA6260250A	Hda La Lopera	Adelmo Rosales
		34	613,177.26	1,131,404.96	CA6260261A	Naguanagua	Pedro Girón
		35	611,351.63	1,131,399.16	CA6260262A	Mañongo Naguanagua	Frantick Sadick
		36	616,816.31	1,135,103.01	CA6260263A	La Cumaca	Adelmo Rosales
		37	616,835.63	1,129,266.60	CA6260273A	Los Guayos	Heriberto López
		38	616,843.74	1,126,809.17	CA6260274A	Los Guayos	Jorge Hernández

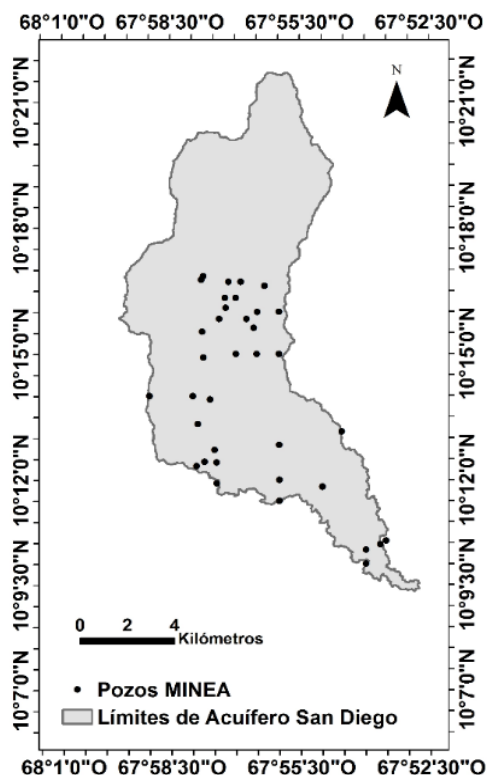


Figura 13: Ubicación de los pozos de muestreo de caudales y niveles de agua registrados en el MINEA del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo. Fuente: Elaboración propia.

El tercer productor de datos de este estudio fue el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC), con administración vigente reconocida ante el Consejo Universitario de la Universidad de Carabobo, según resolución No CD-035-468-2015 (Anexo I). En el CIHAM-UC se crearon y desarrollaron 21 tesis de pregrado asistidas por el Coordinador, Dra. Adriana M. Márquez R., según oficio CIHAM UC 050-21 en el acuífero del Municipio San Diego durante el período 2015-2019 (Anexo I). Este aporte fue avalado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil UC debido al trabajo desarrollado con un grupo de 42 estudiantes de la Universidad de Carabobo (Anexo I). En la Tabla 4 y Figura 15 se muestra la ubicación de 38 pozos ubicados en el acuífero del Municipio San Diego y 63

muestreos realizados en el período de estudio, especificando (i) la localización en coordenadas UTM, (ii) la identificación del sector dentro del Municipio San Diego, (iii) el responsable o administrador del pozo, y (iv) la referencia a los autores citados en el presente documento. Cabe destacar que los administradores de los pozos muestreados incluyeron aquellos ubicados en las zonas: residencial, industrial (por ejemplo, Cigarrera Biggot, ProAgro Embutidos) y recreativa (por ejemplo, IAMDESANDI).

Tabla 4: Componentes del muestreo por racimos para la medición de caudales y niveles desde los pozos administrados por el Ministerio del Poder Popular por HIDROCENTRO y urbanizaciones privadas en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, obtenidos desde tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC) Fuente: Elaboración propia.

No	x	y	Identificación	Responsable	Referencia
1	613796	1130979	IAMDESANDI	ALCALDIA DE SAN DIEGO	Márquez et al. (2015a)
2	613565.98	1129788.15	Morro I	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2015a)
3	613992.28	1129902.97	Morro II	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2015a)
4	613366.96	1130435.18	Esmeralda I	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2015a)
5	612589.03	1130935.21	Esmeralda II	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2015a)
6	613059.61	1130594.9	Esmeralda III	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2015a)
7	612706.09	1130457.08	Esmeralda IV	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2015a)
8	613871	1130826	Parque Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2015a)
9	614670	1127508	ProAgro, C.A.	ProAgro, C.A.	Márquez et al. (2015b)
10	612917	1127364	C.A. Venezolana de Pigmento	C.A. Venezolana de Pigmento	Márquez et al. (2015b)
11	613387	1127321	C.A. Venezolana de Pigmento	C.A. Venezolana de Pigmento	Márquez et al. (2015b)
12	613718	1127924	C.A. Venezolana de Pigmento	C.A. Venezolana de Pigmento	Márquez et al. (2015b)
13	612572	1126793	Motel Excalibur	Motel Excalibur	Márquez et al. (2015b)
14	622124	1127239	Colgate Palmolive, C.A.	Colgate Palmolive, C.A.	Márquez et al. (2015b)
15	613948	1127879	Cigarrera Bigott, C.A.	Cigarrera Bigott, C.A.	Márquez et al. (2015b)

16	613949	1127897	Cigarrera Bigott, C.A.	Cigarrera Bigott, C.A.	Márquez et al. (2015b)
17	613760	1127977	Cigarrera Bigott, C.A.	Cigarrera Bigott, C.A.	Márquez et al. (2015b)
18	616373	1138135	Urb. Rivera Country	Urb. Rivera Country	Márquez et al., (2015c)
19	614342	1135517	Urb. Villas de San Rafael	Urb. Villas de San Rafael	Márquez et al., (2015c)
20	615817	1137789	La Cumaca	La Cumaca	Márquez et al., (2015c)
21	613796	1130979	IAMDESANDI	ALCALDIA DE SAN DIEGO	Márquez et al., (2015d)
22	612589.03	1130935.21	Esmeralda II	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015d)
23	613871	1130826	Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015d)
24	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e)
25	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e)
26	614118	1135490	TULIPAN III	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e)
27	614058	1135318	TULIPAN IV	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e)
28	613919	1135999	TULIPAN V	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e)
29	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e))
30	616373	1138135	Urb. Rivera Country	Urb. Rivera Country	Márquez et al., (2015e)
31	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2016a)
32	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2016a)
33	614992	1133241	Urb. Las Aves	Urb. Las Aves	Márquez et al., (2016a)
34	613498	1134157	Urb. Montaserino	Urb. Montaserino	Márquez et al., (2016a)
35	615974.25	1137460.6	Urb. Villas San Diego Country	Urb. Villas de San Diego Country	Márquez et al., (2016b)
36	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2016b)
37	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2016b))
38	613949	1127897	Cigarrera Bigott, C.A.	Cigarrera Bigott, C.A.	Márquez et al., (2016c)
39	614670	1126502	Pozo 13. ProAgro	ProAgro, C.A.	Márquez et al., (2016c)
40	613796	1130979	IAMDESANDI	ALCALDIA DE SAN DIEGO	Márquez et al., (2017a)
41	613503	1134139	Urb. Los Colores, Bosqueserino	Urb. Los Colores	Márquez et al., (2017a)

Tabla 4 (Cont.): Componentes del muestreo por racimos para la medición de caudales y niveles desde los pozos administrados por el Ministerio del Poder Popular por HIDROCENTRO y urbanizaciones privadas en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, obtenidos desde tesis del CIHAM UC. Fuente: Elaboración propia.

42	614668	1126507	ProAgro, C.A.	ProAgro, C.A.	Márquez et al, (2017b)
43	613950	1127884	Cigarrera Bigott, C.A.	Cigarrera Bigott, C.A.	Márquez et al, (2017b)
44	614668	1126507	Protinal Proagro Planta	Protinal Proagro Planta Embutidos	Márquez et al, (2017c)
45	615974.25	1137460.67	Villas de San Diego Country	Urb. Villas de San Diego Country	Márquez et al, (2017d)
46	613949	1127897	Cigarrera Bigott, C.A.	Cigarrera Bigott, C.A.	Márquez et al, (2017d)
47	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2017d)
48	613957	1130618	Parque Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2017e)
49	614197	1130251	Urb. Yuma	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2017e)
50	613448	1134925	Sector Las Casitas	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2017e))
51	613366.96	1130435.18	Esmeralda I	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2017e)
52	613503	1134139	Urb. Los Colores, Bosqueserino	Urb. Los Colores	Márquez et al, (2017f)
53	613796	1130979	IAMDESANDI	Alcaldía San Diego	Márquez et al, (2017f)
54	614197	1130251	Urb. Yuma	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2018a)
55	613566	1129798	El Morro I	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2018a)
56	612912	1131475.759	Colegio Clorinda Azcunes	Colegio Clorinda Azcunes	Márquez et al, (2018b)
57	613957	1130618	Parque Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2018b)
58	613992	1129903	Urb. El Morro	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2018c)
59	615367	1130435	Urb. La Esmeralda	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2018c)
60	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al.,(2019a)
61	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al.,(2019a)
62	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez et al.,(2019b)
63	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al.,(2019b)
64	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2021)
65	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al, (2021)

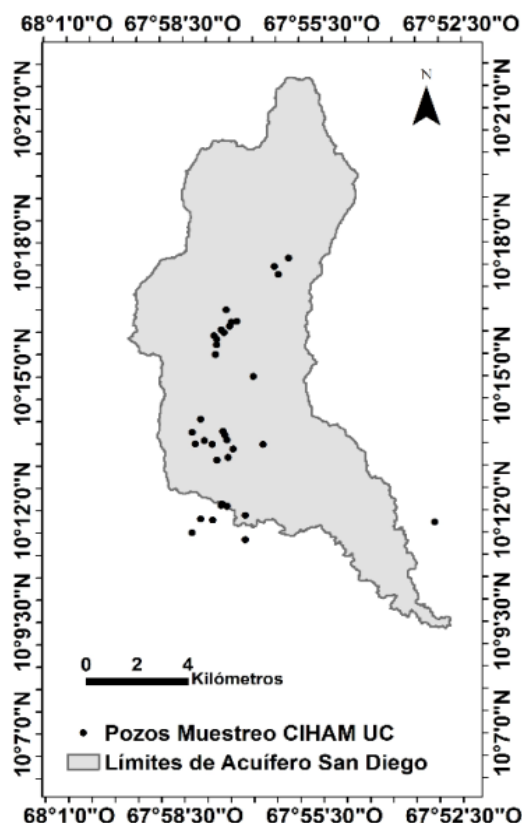


Figura 14: Ubicación de los pozos administrados por HIDROCENTRO y urbanizaciones privadas para muestreo de caudales y niveles de agua en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, obtenidos desde tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC). Fuente: Elaboración propia.

En las Tablas 5-6 así como en las Figuras 16 - 17 se presentan los elementos del muestreo por racimos de los pozos en el acuífero del Municipio San Diego para las características fisicoquímicas y bacteriológicas medidas durante el período 2015-2019 en los pozos registrados por la Compañía Hidrológica del Centro, C.A. (HIDROCENTRO), Ministerio de Ecosocialismo y Aguas (MINEA) y 21 tesis de pregrado asistidas desde el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC), respectivamente.

Específicamente, en el Anexo I se presentan los soportes de la adquisición de la base de datos de este estudio, los cuales incluyen (i) aval de la empresa HIDROCENTRO por el suministro del inventario de los pozos y la serie de tiempo de los caudales de bombeo mensuales en el período 2015-2019, (ii) aval emitido por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo (UC), por la asesoría de 21 tesis de pregrado aprobadas y asesoradas por la Dra. Adriana Márquez en su rol de coordinador del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC) y como docente adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil UC y (iii) resultados de los análisis de laboratorios certificados por el MINEA y el Laboratorio de Aguas de Aragua, adscrito al MINEA. Con respecto a los análisis de los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos, estos resultados fueron originalmente reportados dentro del contenido de las tesis de pregrado realizadas por Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021.

En la Tabla 5 se muestra que los resultados de los parámetros físicoquímicos realizados por el MINEA se realizaron durante el período 1970-1995 en pozos ubicados dentro de fundos, fincas y haciendas de propiedad pública (por ejemplo, ACUERUR, IAN y MARN), así como de propiedad privada que integran el 70% del registro en la Tabla 5. En la Figura 15 se muestra que los pozos abarcan desde el sector norte hasta el sector sur del acuífero. Los parámetros físicoquímicos fueron tomados desde Márquez y Carrillo, (2015) y reportados en la Tabla 1 del Anexo III, en un trabajo conjunto desarrollado entre el MINEA y el CIHAM-UC titulado como “Vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo”, como se comprueba en el oficio No 2226 de fecha 20 de noviembre de 2015 emitido por el Director Estatal de Ecosocialismo y Aguas, Carabobo, en el Anexo III.

Tabla 5: Componentes del muestreo por racimos para el muestreo de parámetros fisicoquímicos desde los pozos registrados en el MINEA del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, obtenidos desde tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC) Fuente: Elaboración propia. Adaptado de Márquez & Carrillo, (2015)

No	X	Y	Identificación	Fecha	Ubicación	Propietario
1	620,498	1,124,658	CA6260003A	100473	Asent El Roble	IAN
2	614,829	1,136,527	CA6260005A	291191	La Cumaca Hda La Lopera	Mattiole Hnos
3	614,829	1,136,527	CA6260005A	181077	Los Harales	ACUERUR
4	614,093	1,129,030	CA6260006A	161187	Los Harales	ACUERUR
5	614,093	1,129,030	CA6260006A	240287	Los Harales	ACUERUR
6	614,093	1,129,030	CA6260006A	40473	Los Harales	ACUERUR
7	614,093	1,129,030	CA6260006A	230787	Los Harales	ACUERUR
8	614,093	1,129,030	CA6260006A	150169	Los Harales	ACUERUR
9	614,921	1,136,313	CA6260007A	230787	La Cumaca Hda La Lopera	Mattiole Hnos
10	614,921	1,136,313	CA6260007A	171187	La Cumaca Hda La Lopera	Mattiole Hnos
11	614,921	1,136,313	CA6260007A	240287	La Cumaca Hda La Lopera	Mattiole Hnos
12	615,233	1,134,071	CA6260010A	40473	Hda La Caracara	Domingo Jiménez
13	615,233	1,134,071	CA6260010A	161187	Hda La Caracara	Domingo Jiménez
14	614,900	1,133,456	CA6260025A	181077	Hda La Caracara	Domingo Jiménez
15	614,288	1,134,775	CA6260058A	50473	Urb Las Mercedes Casa 3-V36	Davit Stendel
16	613,624	1,133,083	CA6260059A	160573	Club Campestre-V34	JoséGómez
17	613,903	1,131,241	CA6260060A	40473	Hda Yuma San Diego-V32	Alberto Yude
18	613,390	1,130,164	CA6260061A	40473	Hda Santa Ana-V30	Ernesto Facenda
19	614,189	1,127,556	CA6260062A	30473	Hda Castillito-V21	Hermanos Iozano
20	619,129	1,124,408	CA6260074A	110473	Gja Palmarito Los Robles V127	Oscar Díaz
21	615,595	1,134,871	CA6260078A	40473	Hda La Caracara	Domingo Jiménez
22	614,186	1,128,477	CA6260080A	30473	Hda Los Arales	Diógenes Chacín
23	614,186	1,128,477	CA6260080A	200691	Hda Los Arales	Diógenes Chacín
24	613,669	1,128,506	CA6260081A	140379	Gja Carolina	Carolina De Covacs
25	613,669	1,128,506	CA6260081A	30473	Gja Carolina	Carolina De Covacs
26	613,699	1,128,506	CA6260081A	171077	Gja Carolina	Carolina De Covacs
27	615,749	1,134,380	CA6260082A	40473	Hda La Caracara	Domingo Jiménez
28	614,894	1,135,698	CA6260083A	40473	Hda La Milagrosa	Reina Martínez
29	614,560	1,135,267	CA6260084A	50473	Hda San Fco Cupira	Pedro Borbón
30	615,195	1,136,406	CA6260085A	60473	Hda Sabana Del Medio	Nicolás Márquez
31	616,199	1,136,225	CA6260086A	60473	Hda La Miguelera	Nicolás Márquez
32	616,199	1,136,225	CA6260086A	140379	Hda La Miguelera	Nicolás Márquez
33	614,678	1,136,404	CA6260087A	60473	Hda San Rafael	Pedro R Aristigueta
34	614,528	1,135,697	CA6260088A	60473	Fca Sabana Del Medio	Hermanos Carreno
35	620,043	1,124,227	CA6260099N	30579	Los Cerritos	MARNR
36	620,043	1,124,228	CA6260099N	270679	Los Cerritos	MARNR
37	620,043	1,124,229	CA6260099N	210390	Los Cerritos	MARNR

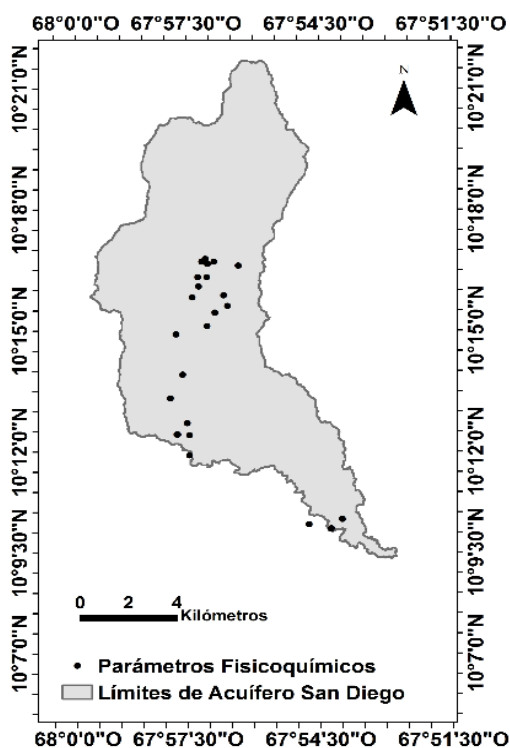


Figura 15: Ubicación de los pozos registrados en MINEA para el muestreo de los parámetros fisicoquímicos en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, Fuente: Elaboración propia. Adaptado de Márquez & Carrillo, (2015)

En la Tabla 6 se presentan los estudios desarrollados a través de las tesis asesoradas por el CIHAM UC, en los cuales se reportan caracterizaciones de parámetros físicoquímicos y bacteriológicos realizados por laboratorios certificados por el MINEA y por el Laboratorio de Aguas Aragua adscrito al MINEA. Los resultados de las caracterizaciones de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del Municipio San Diego, Estado Carabobo se han incluido en el Anexo I. Las caracterizaciones incluyeron 42 muestreos realizados en áreas de uso residencial predominantemente, y en menor medida en zonas recreativas e industriales del acuífero del Municipio San Diego. Las tesis de pregrado involucradas abarcan documentos aprobados en el período 2015-2021.

Tabla 6: Componentes del muestreo por racimos para el muestreo de parámetros fisicoquímicos desde los pozos administrados por HIDROCENTRO y urbanizaciones privadas en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, obtenidos desde tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC)
Fuente: Elaboración propia. Adaptado de Márquez & Carrillo, (2015)

No	x	y	Identificación	Responsable	Referencia
1	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e)
2	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e))
3	614118	1135490	TULIPAN III	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e)
4	614058	1135318	TULIPAN IV	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e)
5	613919	1135999	TULIPAN V	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e)
6	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2015e)
7	616373	1138135	Urb. Rivera Country	Urb. Rivera Country	Márquez et al., (2015e)
8	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2016a)
9	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2016a)
10	614992	1133241	Urb. Las Aves	Urb. Las Aves	Márquez et al., (2016a)
11	613498	1134157	Urb. Montaserino	Urb. Montaserino	Márquez et al., (2016a)
12	615974.25	1137460.67	Urb. Villas de San Diego Country	Villas de San Diego Country	Márquez et al., (2016b)
13	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2016b)
14	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2016b)
15	613949	1127897	Cigarrera Bigott, C.A.	Cigarrera Bigott, C.A.	Márquez et al., (2016c)
16	614670	1126502	Pozo 13. ProAgro	ProAgro, C.A.	Márquez et al., (2016c)
17	613796	1130979	IAMDESANDI	ALCALDIA DE SAN DIEGO	Márquez et al., (2017a)
18	613503	1134139	Urb. Los Colores, Bosqueserino	Urb. Los Colores	Márquez et al., (2017a)
19	614668	1126507	ProAgro, C.A.	ProAgro, C.A.	Márquez et al., (2017b)
20	613950	1127884	Cigarrera Bigott, C.A.	Cigarrera Bigott, C.A.	Márquez et al., (2017b)
21	614668	1126507	Protinal Proagro	Protinal Proagro Planta Embutidos	Márquez et al., (2017c)
22	615974.25	1137460.67	Villas de San Diego Country	Urb. Villas de San Diego Country	Márquez et al., (2017d)
23	613949	1127897	Cigarrera Bigott, C.A.	Cigarrera Bigott, C.A.	Márquez et al., (2017d)
24	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2017d)
25	613957	1130618	Parque Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2017e)
26	614197	1130251	Urb. Yuma	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2017e)
27	613448	1134925	Sector Las Casitas	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2017e)
28	613366.96	1130435.18	Esmeralda I	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2017e)
29	613503	1134139	Urb. Los Colores,	Urb. Los Colores	Márquez et al., (2017f)
30	613796	1130979	IAMDESANDI	ALCALDIA DE SAN DIEGO	Márquez et al., (2017f)
31	614197	1130251	Urb. Yuma	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2018a)
32	613566	1129798	El Morro I	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2018a)
33	612912	1131475.759	Colegio Clorinda Azcunes	Colegio Clorinda Azcunes	Márquez et al., (2018b)
34	613957	1130618	Parque Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2018b)
35	613992	1129903	Urb. El Morro	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2018c)
36	615367	1130435	Urb. La Esmeralda	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2018c)
37	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2019a)
38	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2019a)
39	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2019b)
40	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2019b)
41	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2021)
42	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al., (2021)

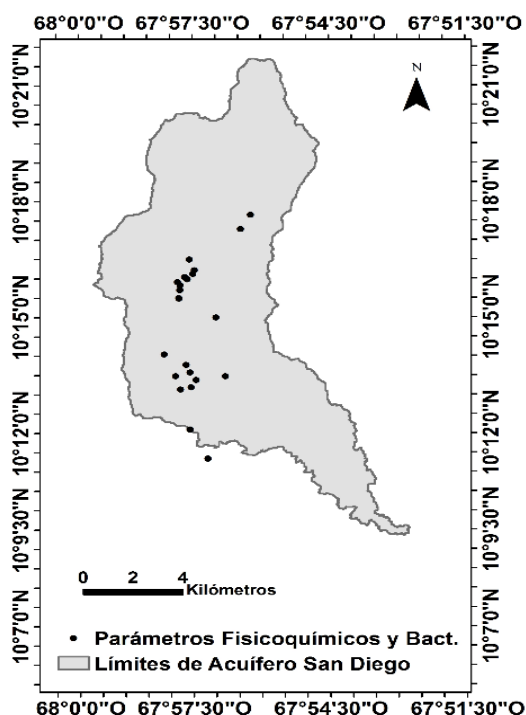


Figura 16: Ubicación de los pozos registrados de HIDROCENTRO y urbanismos privados para el muestreo de los parámetros fisicoquímicos en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, por el Centro de Investigaciones de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC) Fuente: Elaboración propia.

3.5 Fases de la investigación y técnicas de recolección de datos.

Las fases de la investigación abarcan los procedimientos para dar respuestas a los objetivos específicos y general del presente estudio.

3.5.1 Caracterización de los constituyentes hidro-geoquímicos del acuífero de San Diego en el período 2015-2018.

La caracterización de los constituyentes hidro-geoquímicos del agua subterránea se basa en un conjunto de trabajos de pre-grado desarrollados

desde el año 2015 hasta inicios del año 2018, por lo que se realizó la investigación documental sobre ellos y su análisis.

Los procedimientos que se presentan a continuación son los utilizados por los autores de esos trabajos.

3.5.1.1 Procedimiento de medición de niveles de agua en los pozos subterráneos

Medición de los niveles de agua con uso de una cinta eléctrica

La medición de la profundidad de la superficie del agua por debajo de la referencia de la superficie terrestre utilizando la cinta eléctrica se realizó siguiendo el procedimiento establecido por el U.S. Geological Survey (USGS) en Cunningham & Schalk, (2011).

Materiales e Instrumentos

- a. En las tesis de pregrado del CIHAM-UC llevadas a cabo por Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021, se utilizó una cinta eléctrica, de doble hilo y graduada en metros, décimas y centésimas de metros, modelo PLM, marca Seba Hydrometrie provista por el CIHAM-UC. La cinta eléctrica estuvo montada en un carrete de suministro eléctrico con manivela que contiene espacio para las baterías y algún dispositivo ("Indicador") para señalar cuando el circuito está cerrado (Figura 18).



Figura 17: Sonda para medir nivel, modelo PLM, marca Seba Hydrometrie. Fuente: Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d,2019a,b; 2021

- b. Un formulario de campo de medición del nivel del agua o computadora de mano para entrada de datos.
- c. Dos llaves con mordazas ajustables u otras herramientas para quitar la tapa del pozo.
- d. Baterías de repuesto.

Instrucciones

- a. Compruebe el circuito de la cinta eléctrica antes de bajar la sonda en el pozo sumergiendo la sonda en el pozo de agua y observando si la luz, y (o) zumbador (denominado colectivamente el "indicador" en este documento) funcionan correctamente para indicar un circuito cerrado. Si la cinta tiene varios indicadores (sonido y luz, por ejemplo), confirman que están operando simultáneamente. Si no lo son, determine la mayor indicador preciso.
- b. Realice todas las lecturas utilizando el mismo punto de deflexión en la escala del indicador, la intensidad de la luz o el sonido para que el agua los niveles serán consistentes entre las mediciones.
- c. Baje la sonda del electrodo lentamente en el pozo hasta que el indicador muestra que el circuito está cerrado y en contacto con se hace

la superficie del agua (Figura 19). Coloque la uña del dedo índice en el cable aislado en el punto de medición y lea el profundidad al agua.

- d. Registre la fecha y hora de la medición. Registre la profundidad al agua medida. Si la cinta ha sido reparada y empalmada o se ha una corrección de calibración (consulte la sección anterior sobre el uso una cinta reparada / empalmada), reste la "Corrección de cinta".
- e. Registre la longitud de corrección de punto de medición en la "Corrección de punto del medición". Registre el nivel de agua en la columna "nivel de agua por debajo de datum en la superficie del terreno" del nivel de agua formulario de campo de medición.
- f. Tire de la cinta hacia arriba y haga una medida de verificación repitiendo los pasos 3 a 5. Registre la medida de control en el formulario de campo. Si la medida de control no está de acuerdo con la medida original dentro de 0.02 pies, continúe tomando medidas hasta que el motivo por falta de acuerdo se determina o los resultados son demostrado ser confiable. Si se realizan más de dos mediciones realizadas, utilice su mejor criterio para seleccionar la medida más representante de las condiciones del campo.
- g. Después de completar la medición del nivel del agua, desinfecte y enjuague esa parte de la cinta que estaba sumergida debajo la superficie del agua. Esto reducirá la posibilidad de contaminación de otros pozos de la cinta. Enjuague el cinta a fondo con agua desionizada o del grifo para evitar daño de la cinta. Seque la cinta y rebobine en el carrete de cinta.

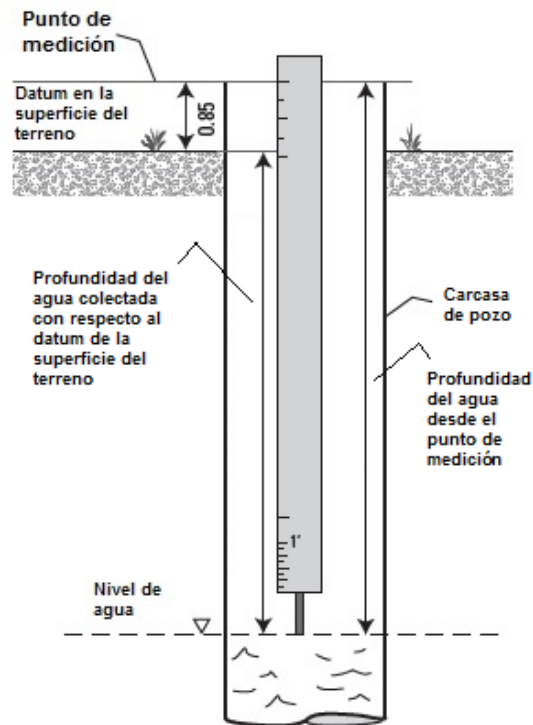


Figura 18: Medición del nivel del agua con una cinta eléctrica graduada. Fuente: Adaptado desde Cunningham & Schalk, (2011).

3.5.1.2 Procedimiento para la estimación del caudal del agua bombeada desde los pozos de agua subterránea

Se empleó un método volumétrico que relaciona volumen captado por unidad de tiempo. El envase fue calibrado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Carabobo, usando cilindros graduados obteniendo una capacidad de 18 L. Así como se usó un cronómetro para medir el tiempo durante un periodo de tiempo que varió entre 1-10 segundos.

3.5.1.3 Procedimiento para la determinación de los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos del agua bombeada desde los pozos de agua subterránea

La determinación de la características físicoquímicas y bacteriológicas fueron llevadas a cabo por laboratorios certificados por el Ministerio de Ecosocialismo y Aguas (MINEA) en los informes obtenidos desde los urbanismos y empresas privadas con actividad dentro del Municipio San Diego como se puede observar en el Anexo I y también se describe en Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021. Así mismo se realizaron determinaciones de parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del Municipio San Diego, referenciados en 42 estudios consistentes de tesis de pregrado dirigidas por el CIHAM –UC (Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021), los cuales fueron listados en la Tabla 6. Las determinaciones de los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos se realizaron en el Laboratorio Ambiental Aragua, bajo la Dirección Estatal para Ecosocialismo y Aguas, cuyos resultados se muestran en el Anexo I.

De acuerdo con el Laboratorio Ambiental Aragua, bajo la Dirección Estatal para Ecosocialismo y Aguas, las muestras fueron analizadas en concordancia con lo establecido en las Normas EPA (Environmental Protection Agency, por sus siglas en inglés), Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, (APHA, 2012), ASTM (American Society for Testing and Materials, por sus siglas en inglés) y Norma Internacional ISO/IEC 17025 (2017), según las cuales se analiza al menos el 10% de las muestras por duplicado. En cada corrida analítica son utilizados materiales de referencia o patrones certificados con trazabilidad, los cuales de acuerdo al Procedimiento de Verificación de Ensayos MP-06-0, deben presentar un error inferior al 10% a fin de garantizar la exactitud y precisión de los ensayos efectuados. En las Tablas 7 y 8 se vinculan los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos a los métodos en el Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, (APHA, 2012), los cuales se aplicaron para las determinaciones

en el agua captada desde los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo.

Tabla 7: Método para la determinación de los parámetros fisicoquímicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, según el Laboratorio Ambiental Aragua referenciados en Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021 (Anexo I).

PARÁMETROS	UNIDAD	MÉTODO (*)
Conductividad Eléctrica	μS/cm	SM 2510-B
pH	Adim	SM 4500- H ⁺ B
Temperatura	°C	SM 2550 B
Color real	Unid. Pt. Co	SM 2120 B
Turbiedad	NTU	SM 2130 B
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	SM 2340-C
Dureza Cálcica	mg/L CaCO ₃	SM 3500-D
Dureza Magnésica	mg/L CaCO ₃	SM 3500-Mg-E
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	SM 2320-B
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	SM 2540-C
Cloruro	mg/L	SM 4500-B
Sulfato	mg/L	SM 4500-E
Nitritos (NO ₂)	mg/L	SM 4500-C
Nitratos (NO ₃)	mg/L	SM 4500-C
Calcio	mg/L	SM 3500-D
Magnesio	mg/L	SM 3500-E
Hierro Total	mg/L	SM 3120 B
Cobre	mg/L	SM 3120 B
Aluminio	mg/L	SM 3120 B
Manganeso Total	mg/L	SM 3120 B
Sodio	mg/L	SM 3120 B
Zinc	mg/L	SM 3120 B

(*) SM: Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 22 st. (APHA, 2.012)

Tabla 8: Método para la determinación de los parámetros bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, según el Laboratorio Ambiental Aragua, referenciados en Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021 (Anexo I).

PARÁMETROS	UNIDAD	MÉTODO (*)
Cloro Residual	mg/L	SM 4500 Cl -G
Heterotrofos	UFC/mL	SM 9215 A y B
Coliformes Totales	NMP/100 mL	SM 9221 B
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	SM 9221 E

(*) SM: Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater 22 st. (APHA, 2.012)

3.5.2 Determinación de los parámetros geofísicos e hidráulicos del acuífero del Municipio San Diego en el período 2015-2018.

El acuífero del Municipio San Diego posee características que lo identifican de tipo confinado, ya que posee estratos impermeables (arcillas, arenas finas) en las capas superiores, intercaladas e inferiores, como esto puede ser comprobado en los 28 perfiles litológicos de los pozos registrados ante el MINEA, y ubicados dentro del acuífero (Figura 20, Tabla 2 del Anexo IV). Según Bear y Cheng, (2011), en un acuífero confinado la presión del agua en él es tal que el nivel de agua en un pozo que está abierto estará en, o aumentará por encima de la superficie límite superior impermeable. La superficie **piezométrica** de un acuífero confinado está por encima del techo impermeable de este último. En un acuífero confinado el agua se encuentra bajo presión, en la misma forma que en una tubería. Por lo tanto, en el caso de perforar un pozo en este estrato, el agua sube por el pozo por sobre el nivel de confinamiento (Guevara & Cartaya, 2004). Bajo la condición de confinamiento, el procedimiento aplicado en este estudio para la determinación de los parámetros geofísicos e hidráulicos implica considerar la condición de flujo de no permanente hacia un pozo en un acuífero confinado (Guevara & Cartaya (2004).

Flujo no permanente hacia pozos

A pesar de que el flujo en pozos es tratado frecuentemente como un problema de flujo permanente (las condiciones no cambian con el tiempo), la mayoría de los casos que se encuentran en la realidad son de condiciones no permanentes (varían con el tiempo) (Guevara & Cartaya, 2004). Durante el período lluvioso del año ocurre una recarga subterránea como consecuencia de la infiltración del agua proveniente de la precipitación. Cuando el agua

subterránea es bombeada a una tasa constante se reduce el volumen total del almacenamiento del acuífero, pero tan pronto como caen las lluvias se rellena de nuevo. Luego el nivel de la superficie libre en un acuífero no confinado es abatido a medida que continúa el bombeo. Excepciones a este proceso lo constituyen aquellos casos en los que hay recarga directa desde ríos o lagos. La solución para un flujo no permanente en un pozo confinado fue derivada por Theis, (1935).

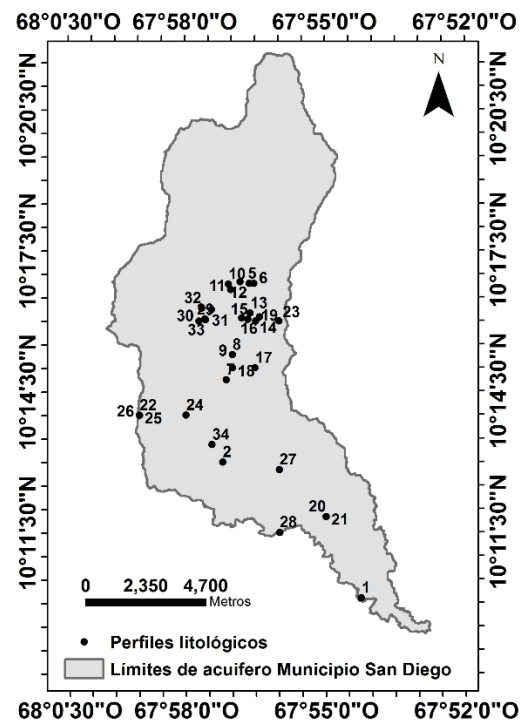


Figura 19: Perfiles litológicos en la cuenca del acuífero de San Diego, Estado Carabobo. Fuente: Márquez & Carrillo, (2015), Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c

La solución de la ecuación diferencial parcial que describe el sistema no permanente se da en forma de una integral exponencial y puede expresarse como sigue: (Theis, 1935):

$$h_o - h = \left[\frac{Q}{4\pi T} \right] W(u) \quad (4)$$

$h_o - h$ = abatimiento en m

Q = descarga en (m³/s)

T = coeficiente de transmisibilidad (m³/día/m)

$W(u)$ = una función de pozo

El coeficiente de transmisibilidad T viene a ser el producto de la permeabilidad K y el espesor del acuífero m y posee las dimensiones de m³/d/m. La función de pozo $W(u)$ viene a ser una integral exponencial, que no puede evaluarse en términos de funciones simples. Los valores de $W(u)$ para varias magnitudes de

u se encuentran tabulados en Guevara y Cartaya (2004), la cual a su vez se da como:

$$u = \left[\frac{S}{4T} \right] \frac{r^2}{t} \quad (5)$$

Donde:

r = distancia desde el pozo hasta el piezómetro de observación en m.

t = tiempo desde que se inicia el bombeo en días

S = coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento está relacionado con la compresibilidad del sistema y se puede considerar como el agua removida de una columna vertical de un metro cuadrado en el acuífero, cuando la altura de presión P se hace descender en 1 m.

a) *Determinación de los parámetros hidráulicos mediante método gráfico*

Las propiedades T y S del acuífero se pueden determinar bombeando un caudal variable Q y midiendo el abatimiento para varios intervalos de tiempo. Las propiedades del acuífero no pueden ser establecidas directamente, pero existen técnicas gráficas para su determinación indirecta. Para analizar este procedimiento, obsérvese que en las Ecuaciones (4) y (5) los términos encerrados entre corchetes son constantes para un pozo particular y pueden considerarse como constantes de proporcionalidad. Por lo tanto un gráfico de $W(u)$ vs. u debería tener la misma forma que un gráfico de $(h_0 - h)$ vs. (r^2/t) . La diferencia resultante de las constantes de proporcionalidad se manifiesta en una diferencia de escala entre ambos gráficos. El procedimiento gráfico consiste en dibujar en papel doble logarítmico $W(u)$ vs u utilizando los valores tabulados en Guevara y Cartaya, (2004), como se muestra en la Figura 21.

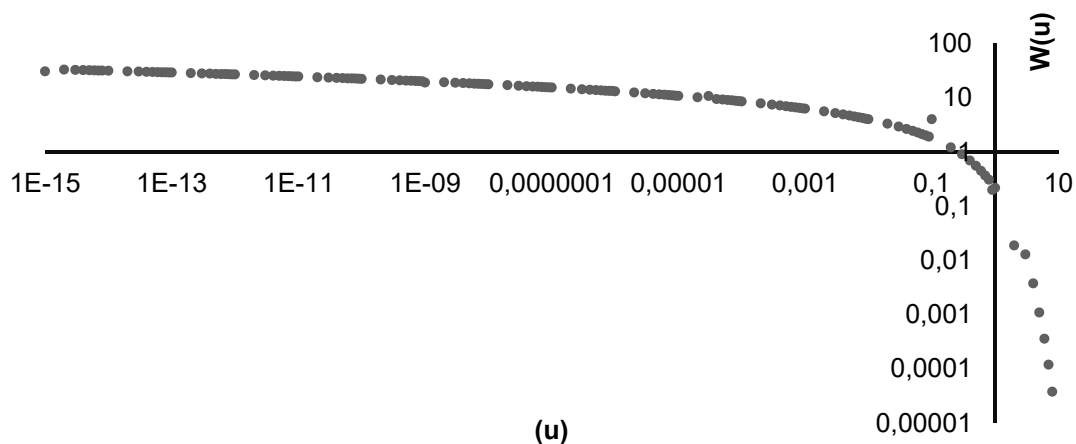


Figura 20: Gráfico de la función de pozo $W(u)$ vs (u) . Curva Típica. Fuente: Elaboración propia. Adaptación de los datos tabulados en Guevara y Cartaya (2004).

Con los valores medidos se construye el otro gráfico de $(h_0 - h)$ vs. (r^2/t) , como se muestra en la Figura 22. Uno de los gráficos se elabora en papel

transparente. Ambos gráficos se superponen como se muestra en la Figura 23. Manteniendo las coordenadas paralelas se trasladan hasta que las curvas coincidan tanto como sea posible (Guevara & Cartaya, 2004)..

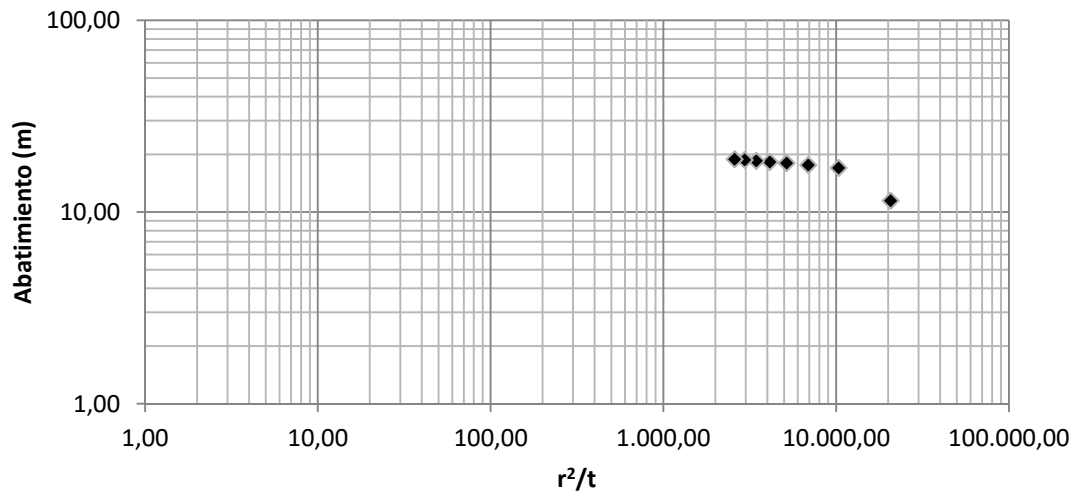


Figura 21: Gráfico de los valores $(h_0 - h)$ vs. (r^2/t) . Fuente: Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

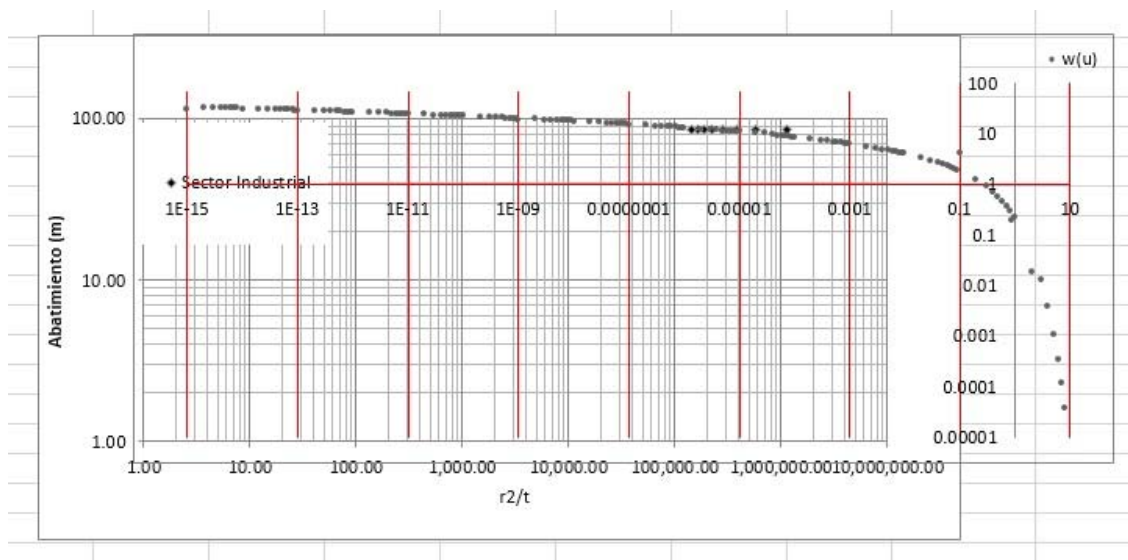


Figura 22: Superposición de las Figuras 21 y 22. Fuente: Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

b) Métodos de pruebas de bombeo

Las pruebas de bombeo del pozo son necesarias para determinar la capacidad del pozo, abatimiento, habilidad de producción a largo plazo y parámetros para el tamaño de la bomba permanente y para tomar muestras de agua para análisis. De acuerdo con ANSI/AWWA A100, (1997) y NTC 5539, (2007), para la prueba de bombeo se debe usar una bomba de prueba y mecanismos para medir el nivel de agua y el caudal.

Pruebas de abatimiento escalonadas

Las pruebas de abatimiento escalonadas se deben realizar para determinar los parámetros generales de las pruebas de bombeo de caudal constante ANSI/AWWA A100, (1997) y NTC 5539, (2007). Estos parámetros son coeficiente transividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S). El pozo se debe bombear con caudales progresivamente mayores, y la longitud de cada emisión por escalón debe ser lo suficientemente larga para mostrar la indicación de una tendencia a una línea recta al graficar abatimiento contra logaritmo del tiempo transcurrido desde el inicio del bombeo.

Medidas del nivel de agua

Las medidas del nivel de agua se deben tomar antes, durante y después de la prueba de bombeo para así obtener información de base (niveles estáticos del agua), los efectos del bombeo (niveles de agua durante bombeo) y un perfil de la recuperación del nivel de agua desde el nivel del agua durante el bombeo hasta el estado original. La frecuencia de medición de los niveles de agua durante la prueba de bombeo debe ser tal que una definición adecuada de los datos de tiempo-abatimiento se haga disponible.

3.5.3 Determinación de los parámetros de balance del agua subterránea del acuífero San Diego en el período 2015-2018

El método aplicado incluye los tres pasos siguientes (Figura 23): i) recolección de información, ii) procesamiento de información y iii) generación de resultados.

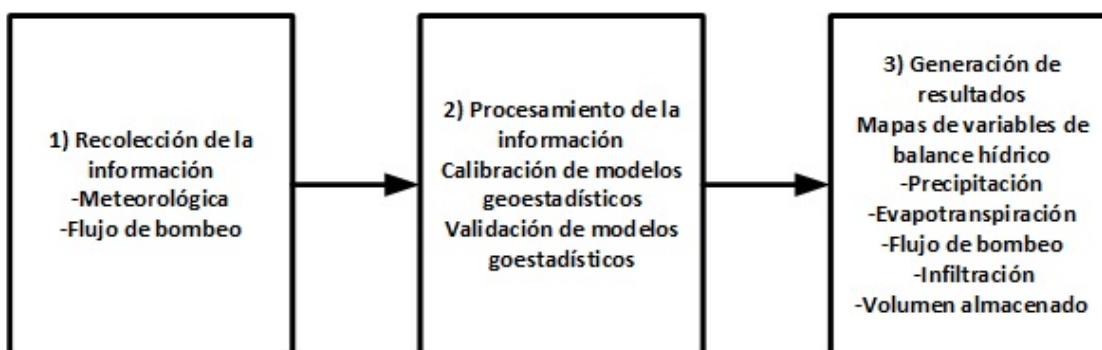


Figura 23: Flujo de trabajo para el modelado geoestadístico espacio-temporal de parámetros de balance hídrico en el acuífero San Diego, Estado Carabobo, Venezuela.

3.5.3.1 Recolección de la información:

La base de datos utilizada en esta actividad ha sido adquirida desde tres fuentes de información, las cuales son (Márquez et al., 2018e, f): a) Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) perteneciente al Ministerio de Relaciones Interiores, Justicia y Paz (descargada de la página web: <http://www.inameh.gob.ve/web/>, b) Compañía Hidrológica del Centro C.A. (HIDROCENTRO) mediante el suministro de caudales en el período 2015-2018 según el aval en Anexo V, c) Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC) mediante los estudios desarrollados por Márquez y Carrillo (2015); Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c, 2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021.

3.5.3.2 Procesamiento de información

i) *Predicción espacial de las variables hidrometeorológicas:*

Se aplican modelos de predicción espacial estadística para la estimación de los parámetros hidrometeorológicos medidos en campo (Precipitación, evapotranspiración y flujo de bombeo). Un modelo de predicción espacial estima los valores de la variable objetivo (z) en alguna nueva ubicación s_0 ; siendo un conjunto de observaciones de una variable objetivo z denotada como $z(s_1), z(s_2), \dots, z(s_n)$, donde $s_i = (x_i, y_i)$ es una ubicación y x_i e y_i son las coordenadas (ubicaciones primarias) en el espacio geográfico y n es el número de observaciones. El dominio geográfico de interés (área, superficie terrestre, objeto) se puede denotar como A . El modelo de predicción espacial define las entradas, salidas y el procedimiento computacional para derivar salidas basadas en las entradas dadas por la expresión (Hengl, 2007):

$$\hat{z}(s_0) = E\{Z/z(s_i), q_k(s_0), \gamma(h), s \in A\} \quad (6)$$

Donde $z(s_i)$ es el conjunto de datos del punto de entrada, $q_k(s_0)$ es la lista de predictores deterministas y $\gamma(h)$ es el modelo de covarianza que define la estructura de autocorrelación espacial. El tipo de SSPM utilizado es el modelo estadístico denominado Ordinary Kriging (*OK*); cuya técnica fue desarrollada por Krige (1951). Las predicciones se basan en la Ecuación 7:

$$z(s) = \mu + \varepsilon'(s) \quad (7)$$

Donde μ es la función estacionaria constante (media global) y $\varepsilon'(s)$ es la parte estocástica espacialmente correlacionada de la variación. Las predicciones se hacen como en

Matheron (1963) introdujeron al análisis de los datos puntuales, a la derivación y el trazado de las llamadas semivarianzas, diferencias entre los valores vecinos:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \left[(z(s_i) - z(s_i + h))^2 \right] \quad (8)$$

Donde $z(s_i)$ es el valor de la variable objetivo en alguna ubicación muestreada y $z(s_i + h)$ es el valor del vecino a la distancia $s_i + h$. Las semivarianzas frente a sus distancias producen un variograma experimental estándar. A partir del variograma experimental, se puede ajustar utilizando algunos de los modelos de variogramas autorizados, como lineal, esférico, exponencial, circular, Gaussiano, Bessel, de potencia y similares (Isaaks & Srivastava, 1989; Goovaerts, 1997).

ii) *Predicción espacial de la infiltración*

La estimación de la precipitación efectiva en la cuenca del acuífero del Municipio San Diego se realizó mediante la aplicación del método del U.S. Conservation Service (US-SCS) (Guevara & Cartaya, 2004). El método US-SCS comúnmente conocido como el método del número de curva (CN), cuyo objetivo es calcular las abstracciones de agua de una tormenta. En este método la precipitación de excesos (profundidad de escorrentía superficial) es una función de la precipitación total en la cuenca, de un parámetro de abstracción y del número de curva de escorrentía (CN).

En este estudio, para la aplicación del modelo US-SCS se determinaron los componentes adaptados a variables espacialmente distribuidas. La información requerida fue estimada como se indica a continuación:

a.- Condiciones iniciales de la cuenca. Las condiciones iniciales de la cuenca dependen de la precipitación antecedente. Una condición de suelo seco implica la ocurrencia de lluvias precedentes en orden de 0-35 mm. La condición de suelo normal se asocia a la ocurrencia de precipitación entre 35-50 mm. Así como, la condición de suelo húmedo está asociada a una lámina de lluvia mayor a 50 mm. Se asumió condición de suelo húmedo, asociada al número de curva (CNIII). Los valores fueron tomados según el uso y tipo de suelo desde Guevara y Cartaya, (2004). La precipitación fue estimada

b.- Clasificación de los suelos según sus características hidrológicas. Los suelos de la cuenca de San Diego fueron identificados a partir del mapa de clasificación de suelos para Venezuela generado por el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) (Comerma, 1971), encontrando que los mismos se clasifican como del tipo inceptisol, correspondiendo al tipo D (alto potencial de escorrentía).

c.- Condición Hidrológica. El tipo de cobertura vegetal tiene un prevalente efecto sobre el proceso de intercepción, evapotranspiración, escurrimiento superficial e infiltración. La condición hidrológica, como indicador de la situación para la infiltración, se usa como índice de la cobertura vegetal. El porcentaje de cobertura vegetal fue extraído de los mapas de clasificación de usos y coberturas.

d.- Uso de la tierra. Es otro factor que tiene efecto sobre la respuesta de la cuenca a los fenómenos hidrometeorológicos. Se aplicó método de clasificación supervisada a las imágenes del satélite LANDSAT 8OLI en la escala mensual durante el período 2015-2018.

e.- *Coeficiente de escorrentía*. Dependiendo de la clasificación de los suelos, uso de la tierra, tratamiento o práctica y de la condición hidrológica, se determina el Número de Curva. Los valores de CN para las condiciones I y III se encuentran tabulados en la bibliografía o se estiman mediante la ecuaciones (Guevara & Cartaya, 2004).

En cuencas grandes, parte del agua infiltrada retorna como flujo sub-superficial o subterráneo, pero no son consideradas en el análisis de tormentas puesto que tienen un tiempo de retardo suficientemente largo como para no influenciar el hidrograma de escorrentía directa. De acuerdo con lo anterior, la escorrentía es estimada mediante la Ecuación 9:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (9)$$

El U.S.SCS luego de analizar gran cantidad de hidrogramas de cuencas experimentales ha confeccionado un procedimiento para estimar S en base a un valor llamado CN (Número de Curva), que se relaciona con S por la Ecuación 4:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (10)$$

iii) *Balance hídrico*

Las cantidades de agua involucradas en uno o varios de los procesos del ciclo hidrológico, pueden evaluarse generalmente mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (11)$$

Donde:

I = aporte o afluente por unidad de tiempo

O = descarga o efluente por unidad de tiempo

dS/dt = cambio de almacenaje por unidad de tiempo

La Ecuación (11), puede utilizarse como modelo general del balance hidrológico de la tierra, describiendo el balance hídrico debajo de la superficie del terreno, como se expresa en la Ecuación 12.

$$I - ET - Q_b = \Delta S \quad (12)$$

Donde I (infiltración), ET la evapotranspiración y S el almacenaje.

3.5.4 Análisis de la influencia de los constituyentes hidro-geoquímicos del acuífero San Diego sobre el uso sustentable del agua del mismo.

Se comparan los valores actuales de parámetros con las “Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable” (Gaceta Oficial Nro. 36.395, 1998), y con las “Normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la cuenca del Lago de Valencia” (decreto 3.219 de 1999).

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Caracterización de constituyentes hidro-geoquímicos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo en el período 2015 a 2018.

4.1.1 Caracterización del flujo de bombeo en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo

En la Figura 24 se muestra la variación de los flujos de bombeo de 54 pozos del Municipio San Diego en el período 2015-2018, donde se observa una disminución del promedio desde 12 L/s hasta 6 L/s para 2015, cuando se compara con el resto de los años. La distribución espacial de los flujos de bombeo en el acuífero del Municipio San Diego se muestra en la Figura 25, donde se observa que el flujo extraído predominantemente varía en un rango hasta de 6 L/s en las zonas residenciales y se incrementa desde la zona norte hacia la zona sur del acuífero donde están ubicados los comercios e industrias (Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021).

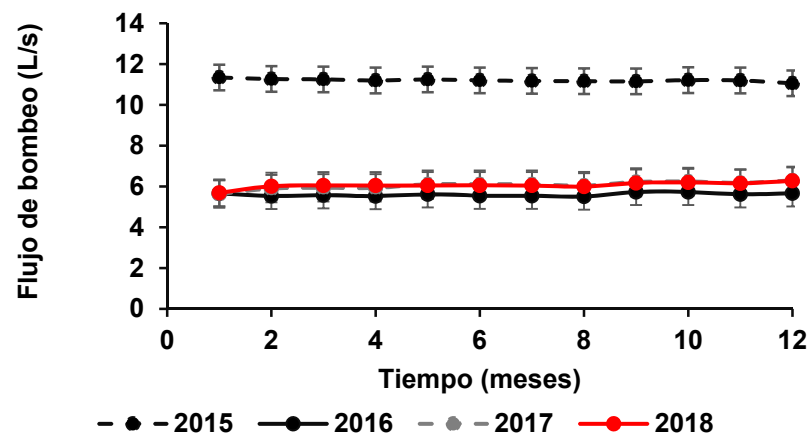


Figura 24: Variación de los flujos de bombeo en los pozos del Municipio San Diego, Estado Carabobo en el período 2015-2018. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

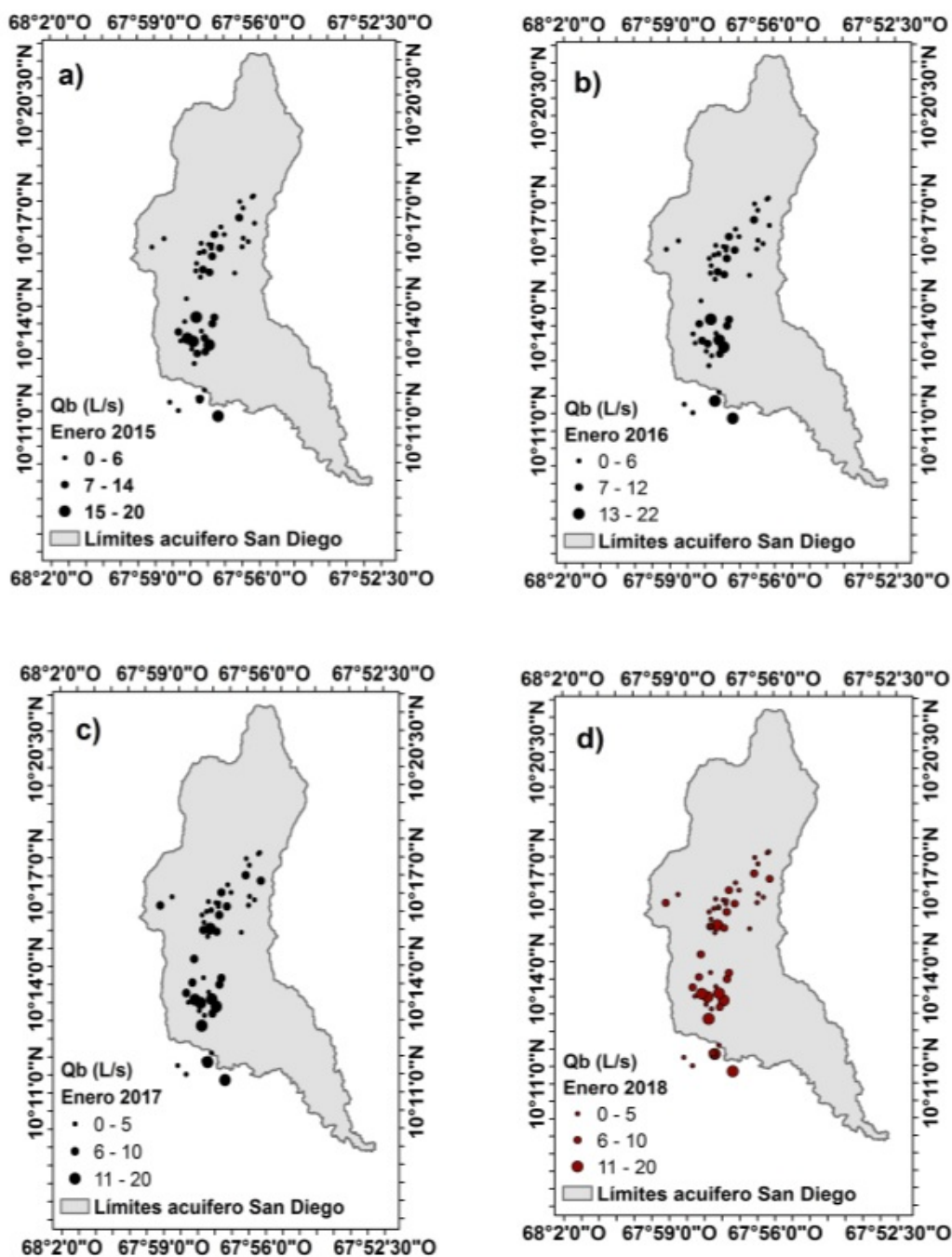


Figura 25: Distribución de los flujos de bombeo en los pozos del Municipio San Diego, Estado Carabobo en el período 2015-2018. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

4.1.2 Caracterización de los niveles dinámicos del agua en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo

En la Figura 26 se muestran los resultados de la caracterización de niveles de agua en el acuífero del Municipio San Diego en el período 2015-2018 derivada de los estudios realizados por Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c, 2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021, Márquez y Carrillo, (2015), donde se observa que los niveles del agua disminuyen desde las zona montañosas del acuífero hacia la planicie del acuífero, siendo más bajos en la frontera entre la zona norte y la zona centro del Municipio San Diego donde se registra un intervalo entre 385 – 435 msnm, implicando hasta 50 m de diferencia relativa con respecto a la superficie del terreno (Figura 2). Así mismo se observa que los niveles decrecen en el sentido del gradiente hidráulico del acuífero hacia el Lago de Valencia, como la principal vertiente del acuífero del Municipio San Diego ubicado hacia la zona sur.

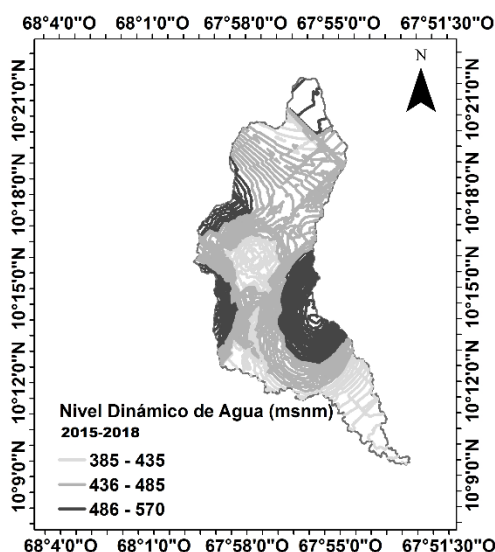


Figura 26: Distribución de los flujos de bombeo en los pozos del Municipio San Diego, Estado Carabobo en el período 2015-2018. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c, 2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021, Márquez y Carrillo, (2015)

4.1.3 Caracterización de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo

En las Figuras 27 y 28 se presentan las frecuencias relativas de ocurrencia y distribución espacial de las concentraciones de los aniones en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos presentes en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021, donde se puede observar que el ión bicarbonato muestra concentraciones similares en el orden de 20 – 25% para el intervalo entre 0 y 400 mg/L. El bicarbonato es el parámetro que de todos los mostrados en la Figura 27 que fue detectado en un intervalo amplio en comparación con el resto de los aniones, los cuales mostraron la mayor frecuencia de ocurrencia para las concentraciones en el primer intervalo de división de las concentraciones de dichos parámetros en las muestras analizadas (Anexo III).

En la Figura 28a se muestra que el bicarbonato resultó en los valores del intervalo más alto en pozos ubicados próximos a la transición entre la zona montañosa y la planicie donde los procesos de disolución de rocas podrían ser influenciados por el cambio abrupto del gradiente hidráulico debido a un cambio de régimen de flujo de supercrítico a crítico o sub-crítico dentro de los estratos donde el acuífero integra la formación geológica como se puede observar en los perfiles litológicos suministrados en el Anexo IV.

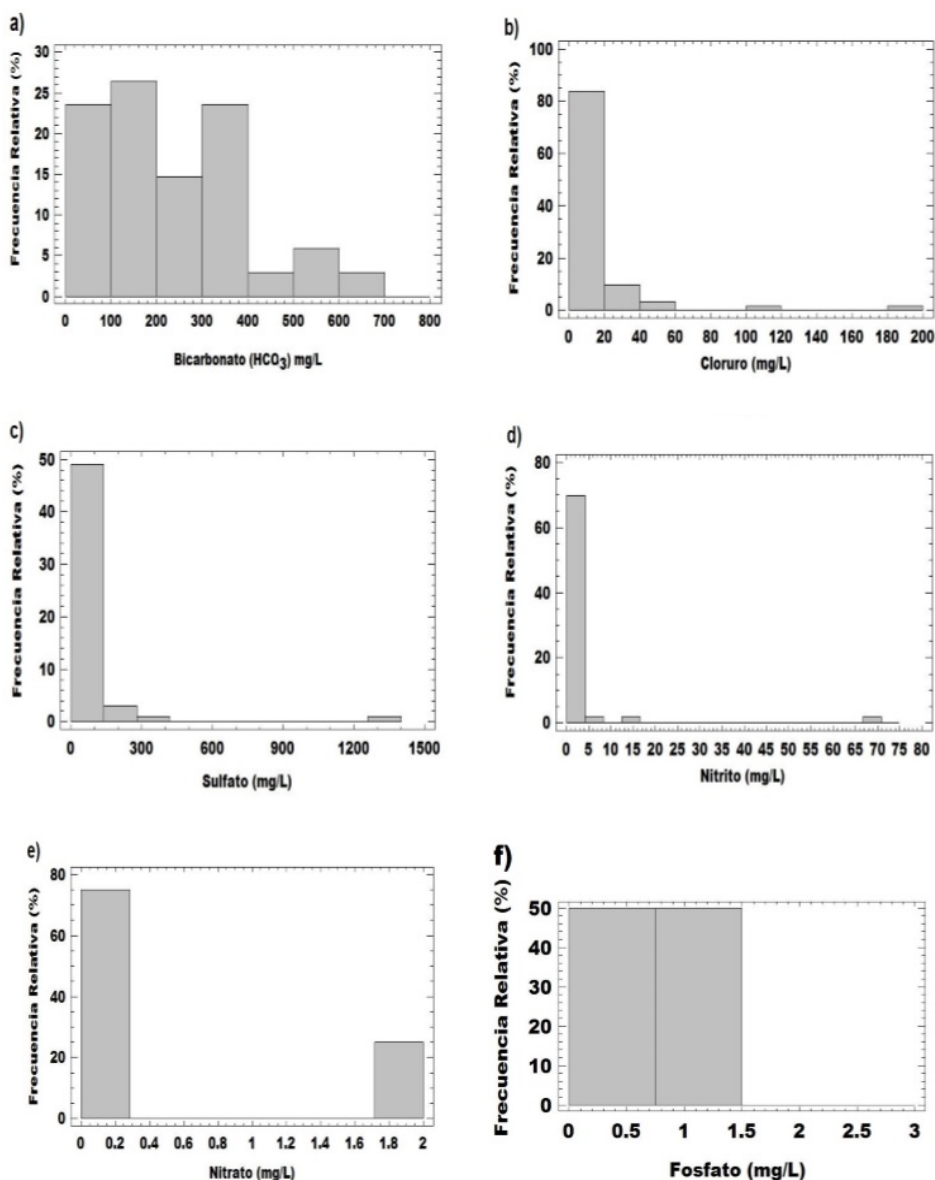


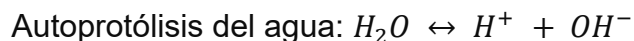
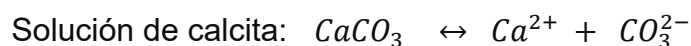
Figura 27: Frecuencia de ocurrencia de las concentraciones de aniones en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

La composición de las aguas de los pozos del acuífero del Municipio San Diego significativamente influenciada por la presencia de iones bicarbonato, sugiere que el acuífero del Municipio San Diego sea de tipo Karstico (Kirsch,

2006), formado por la disolución de rocas carbonatadas (piedra caliza, dolomita). Las cuevas y canales kársticos se encuentran principalmente a lo largo de las fracturas tectónicas o límites de capas horizontales. Los fenómenos kársticos no solo ocurren en la superficie sino también en mayores profundidades en los acuíferos (Merkel et al., 2005). La razón es que la disolución del carbonato es un proceso comparativamente rápido, pero aún lleva algo de tiempo, mientras que el agua puede cubrir una distancia bastante larga a lo largo de una fractura.

La solubilidad de la calcita (CaCO_3) depende de la temperatura y de la presión parcial ejercida por el dióxido de carbono en la matriz porosa del acuífero (Merkel et al., 2005). Con respecto a la temperatura, la solubilidad óptima de la calcita ocurre a 30°C , no a la temperatura máxima de 40°C . En primer lugar, como en el caso de la solubilidad gypsum, la formación del complejo CaCO_3^0 es endotérmica ($\Delta H (\text{CaCO}_3^0) = +3,5$), mientras que la disolución mineral es exotérmica ($\Delta H (\text{CaCO}_3 (\text{s})) = -2,3$). Por tanto, la máxima solubilidad se produce a una temperatura media, en la que la formación del complejo CaCO_3^0 ya ha aumentado y la solubilidad decreciente de $\text{CaCO}_3 (\text{s})$ todavía no predomina.

Con respecto a la presión parcial ejercida por el CO_2 , la solubilidad de la calcita no solo depende de la temperatura sino también del $P (\text{CO}_2)$.



Como se puede observar en las ecuaciones anteriores, un aumento de iones H^+ provoca un consumo de CO_3^{2-} formando el complejo HCO_3^- . De ese

modo aumenta la disolución de CaCO_3 . Puede producirse un aumento de los iones H^+ , por ejemplo, por los ácidos (HCl , H_2SO_4 , HNO_3) pero también por un aumento de la concentración de CO_2 , ya que los iones H^+ se forman con la disolución del CO_2 en agua.



Aunque la disociación inmediata de H_2CO_3 a $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ solo representa el 1%, las reacciones posteriores provocan una disolución de CO_2 mucho mayor. Eso significa que cuanto mayor sea la $P(\text{CO}_2)$, más CaCO_3 se puede disolver. Sin embargo, la solubilidad del CO_2 como gas en agua depende de la temperatura: cuanto mayor es la temperatura, menor es la solubilidad del gas. En consecuencia, inicialmente, la solubilidad de la calcita aumenta con la temperatura debido a la reacción endotérmica de la complejación de CaCO_3^0 , pero con el aumento de temperatura la reacción exotérmica de la disolución de $\text{CaCO}_3(\text{s})$ y la disolución de CO_2 significativamente reducida disminuyen la solubilidad total de la calcita.

En la Figura 28 se muestra que las más altas concentraciones de iones como cloruro (Figura 28b), sulfato (Figura 28c) y nitrato (Figura 28 e) ocurren en las muestras captadas en el Lago de Valencia, como uno de los principales cuerpos de agua del Estado Carabobo, el cual confronta una diversidad de problemas interrelacionados que afectan las condiciones ambientales y atentan contra la calidad de vida de sus habitantes (Guevara, 2000). Los problemas del Lago de Valencia han sido influenciados en gran medida debido a sus características geográficas que marcan una distinción, como una cuenca cerrada (endorreica), así como al acelerado crecimiento poblacional de los últimos 20 años y al desarrollo industrial (principal centro industrial del país).

En las Figuras 29 y 30 se muestran la frecuencia relativa de ocurrencia y la distribución espacial de las concentraciones de cationes en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2019, donde se observa que el ion calcio se distribuye en un intervalo variando entre 0 y 20 mg/L con la mayor frecuencia relativa de ocurrencia (80%), mientras que para concentraciones entre 20 y 120 mg/L fue encontrado con una frecuencia relativa entre 10 y 20%. El resto de los cationes tales como magnesio, potasio, sodio + potasio fueron encontrados con la mayor frecuencia de ocurrencia (50 y 80%) en el intervalo más pequeño entre los valores mínimos y máximos ocurridos. En el caso específico, del sodio + potasio, las concentraciones variaron entre 0 y 20 mg/L para una frecuencia alta (60%), alcanzando hasta 100 mg/L con una frecuencia de ocurrencia menor al 10%. Este resultado aunado al encontrado en el análisis de los cationes, conduce a que la mayor cantidad de pozos tienen en su composición un agua bicarbonatada cálcica con presencia en menor proporción de bicarbonato de sodio, el cual fue encontrado como presente en el agua de los pozos ubicados en la zona agrícola del Lago de Valencia (Figura 30).

Según Guevara, (1990), el contenido de sales en las aguas de riego es un factor que debe ser manejado correctamente para evitar la salinización e improductividad de los suelos agrícolas. Las aguas con baja concentración de sodio, pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Las aguas con muy alto contenido de sodio son inadecuadas para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.

En cuanto a las propiedades y su mayor frecuencia de ocurrencia referidas a la alcalinidad (100 mg/L), dureza cálcica (< 50 mg/L) y dureza total (< 100 mg/L) son un indicador de la presencia predominante de iones de bicarbonato y carbonato, en el sentido que dan capacidad de consumo de ácido al producir una solución tampón (Merkel et al., 2005). En general, los intervalos de ocurrencia de las propiedades como pH, turbiedad y sólidos disueltos son correspondientes a un tipo de agua potable (Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable. Gaceta Oficial Nro. 36.395, febrero 1998).

La tendencia general es que los valores de los parámetros fisicoquímicos dentro del acuífero San Diego ocurren en el intervalo más bajo a la frecuencia más alta en la mayor área del acuífero (zona norte, centro y sur) (Figuras 28, 30, 32 y 34) y se incrementan a los intervalos medios y máximos en la zona industrial y cercana al Lago de Valencia, respectivamente. En cuanto a los parámetros bacteriológicos, tales como coliformes fecales se encontraron valores menores a 1 NMP/100 mL con una frecuencia de ocurrencia de 60%, ocurriendo mayormente en la zona residencial de los sectores norte a sur (Figuras 33 y 34). En cuanto a los coliformes totales resultaron menores a 12 NMP/100 mL con una frecuencia de ocurrencia del 25%.

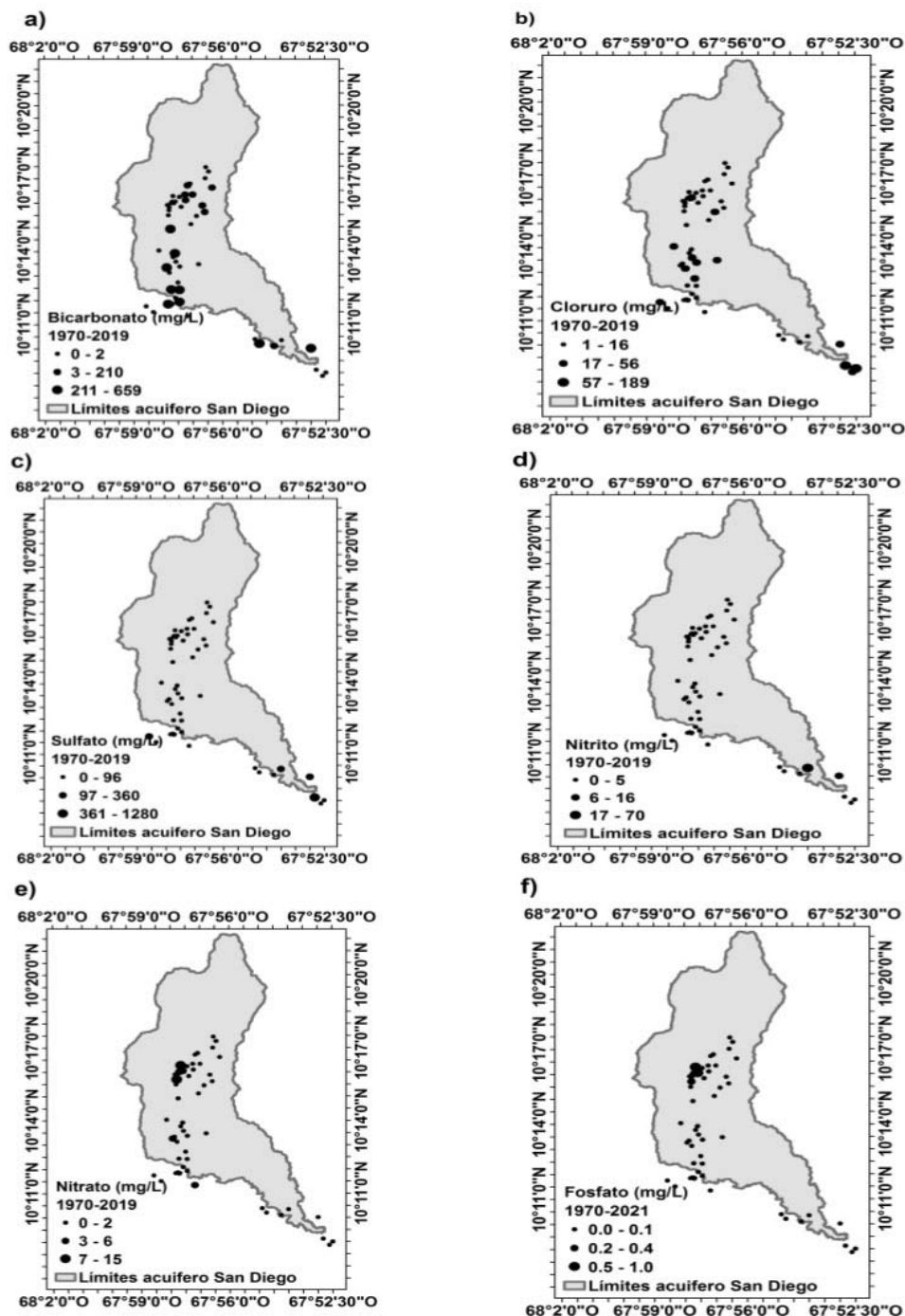


Figura 28: Distribución espacial de las concentraciones de aniones en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

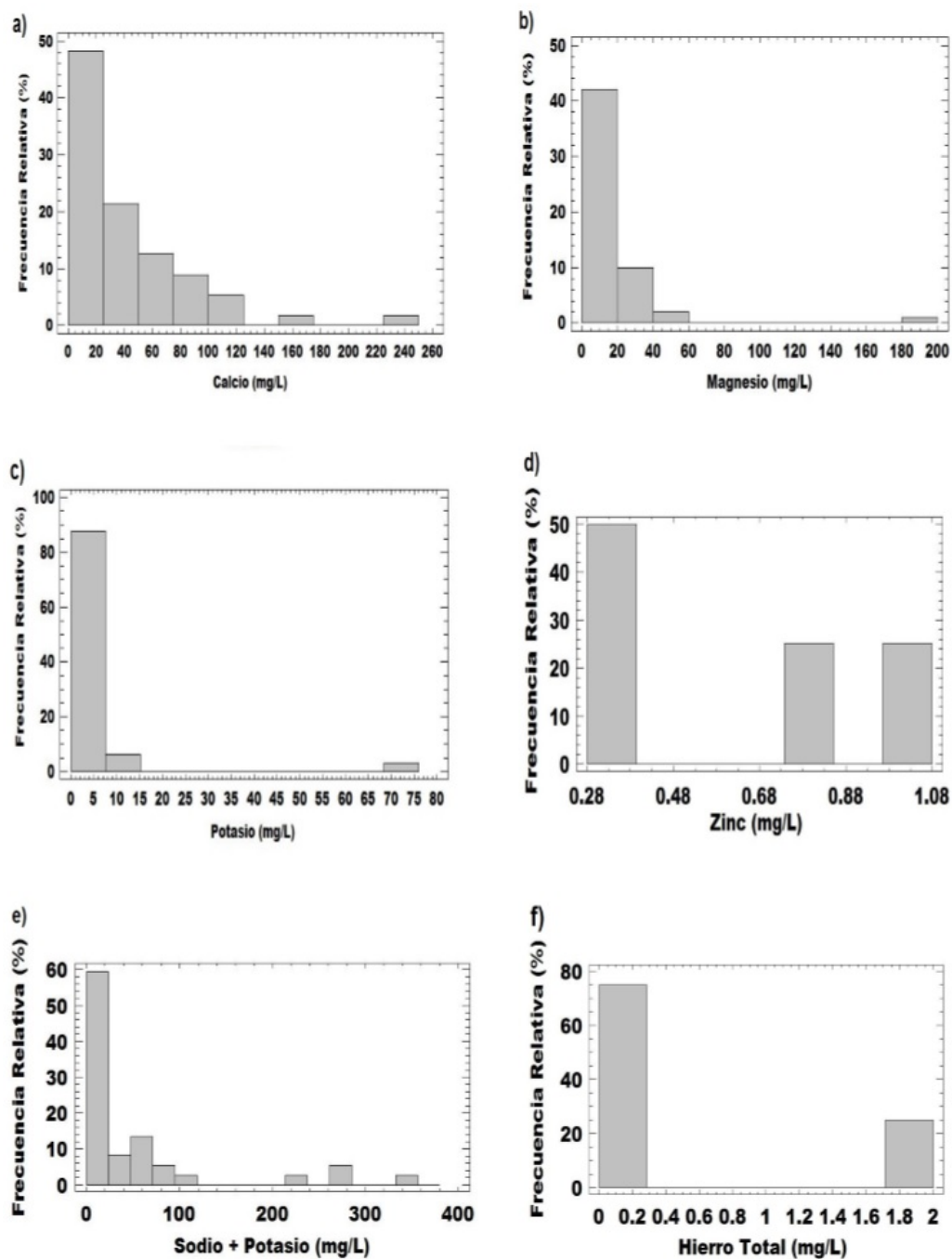


Figura 29: Frecuencia de ocurrencia de las concentraciones de cationes en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

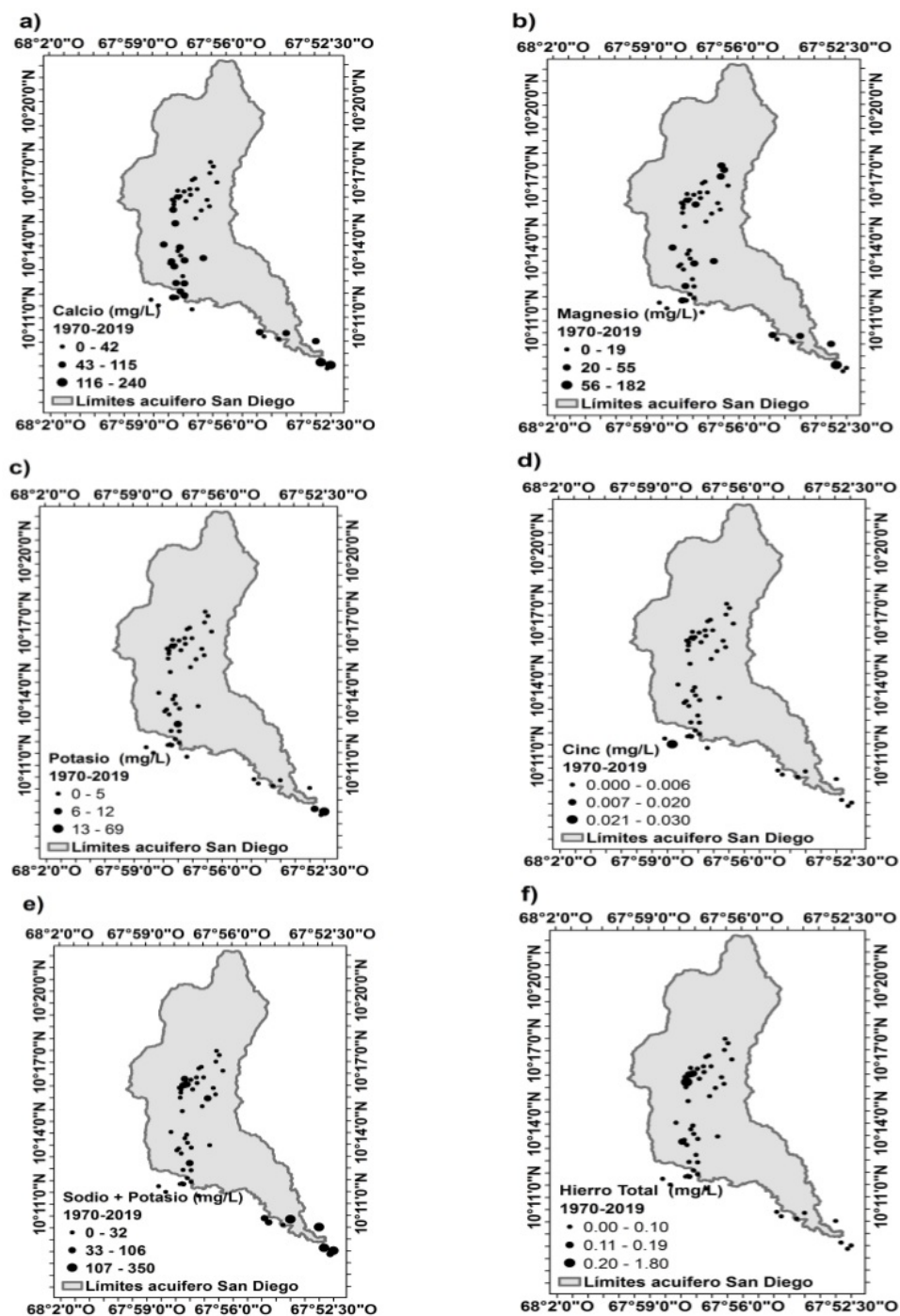


Figura 30: Distribución espacial de las concentraciones de cationes en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2019. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

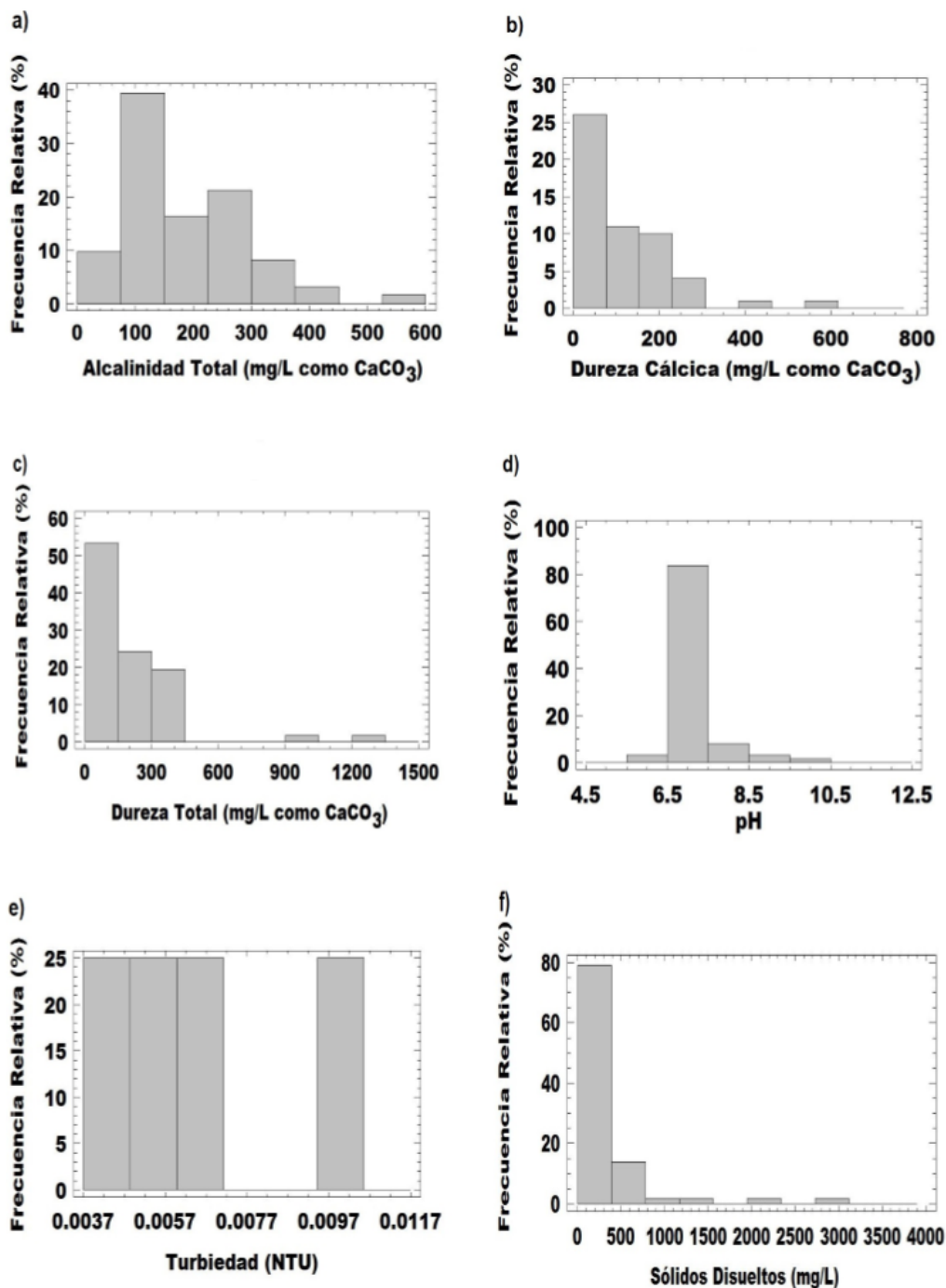


Figura 31: Frecuencia de ocurrencia de las concentraciones de las propiedades en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

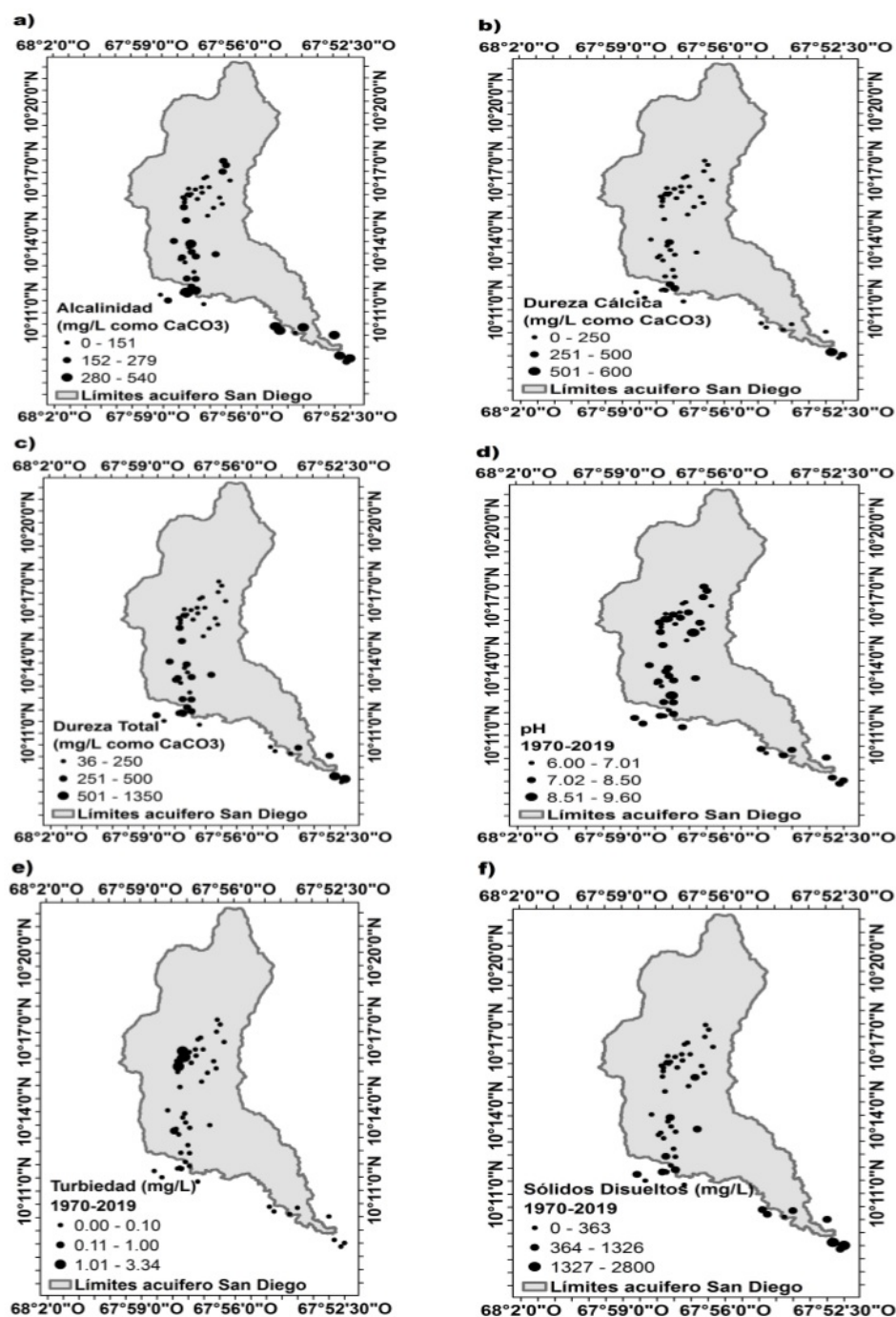


Figura 32: Distribución espacial de las propiedades de los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2019. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

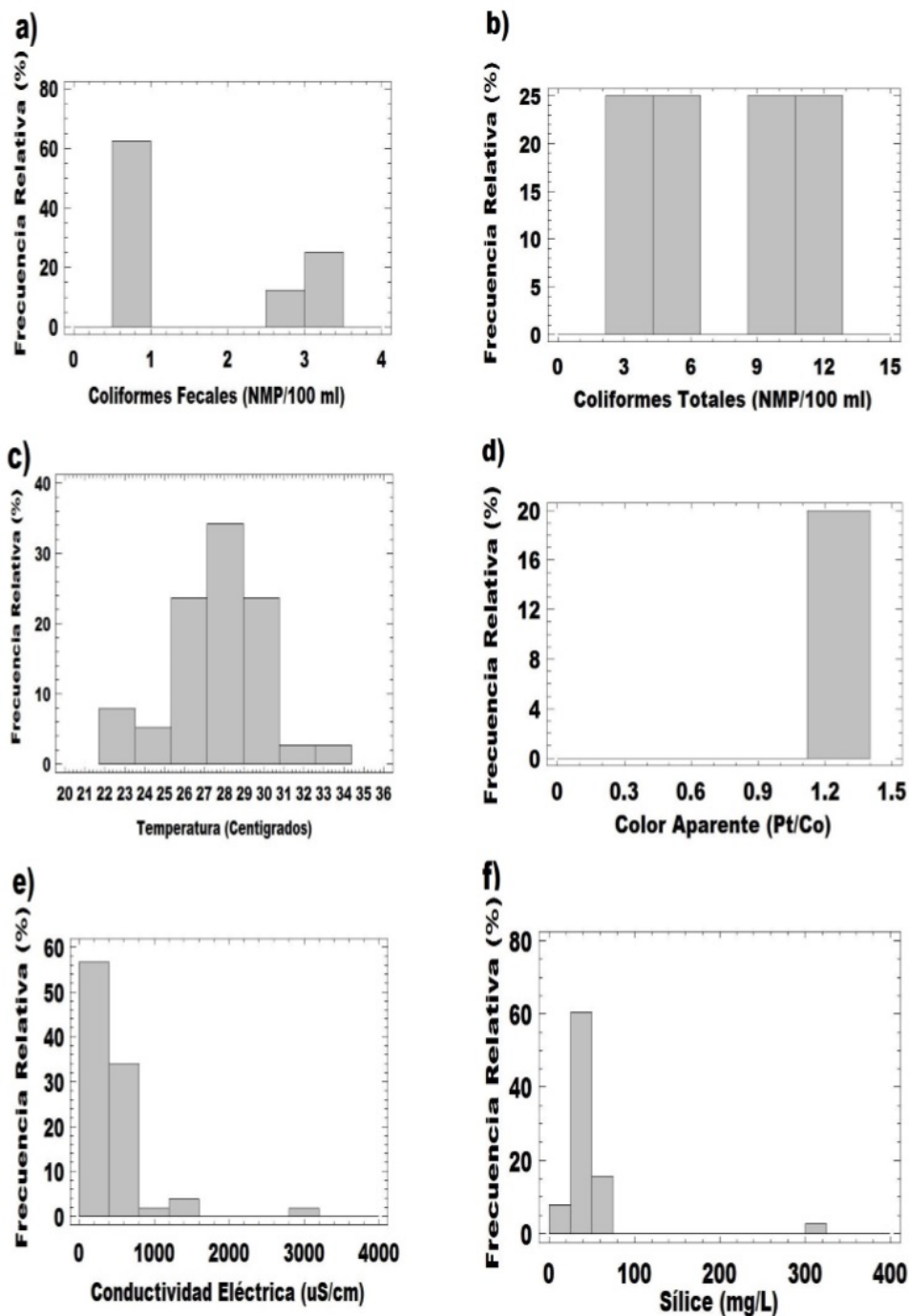


Figura 33: Frecuencia de ocurrencia de las concentraciones de las propiedades en los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2021. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

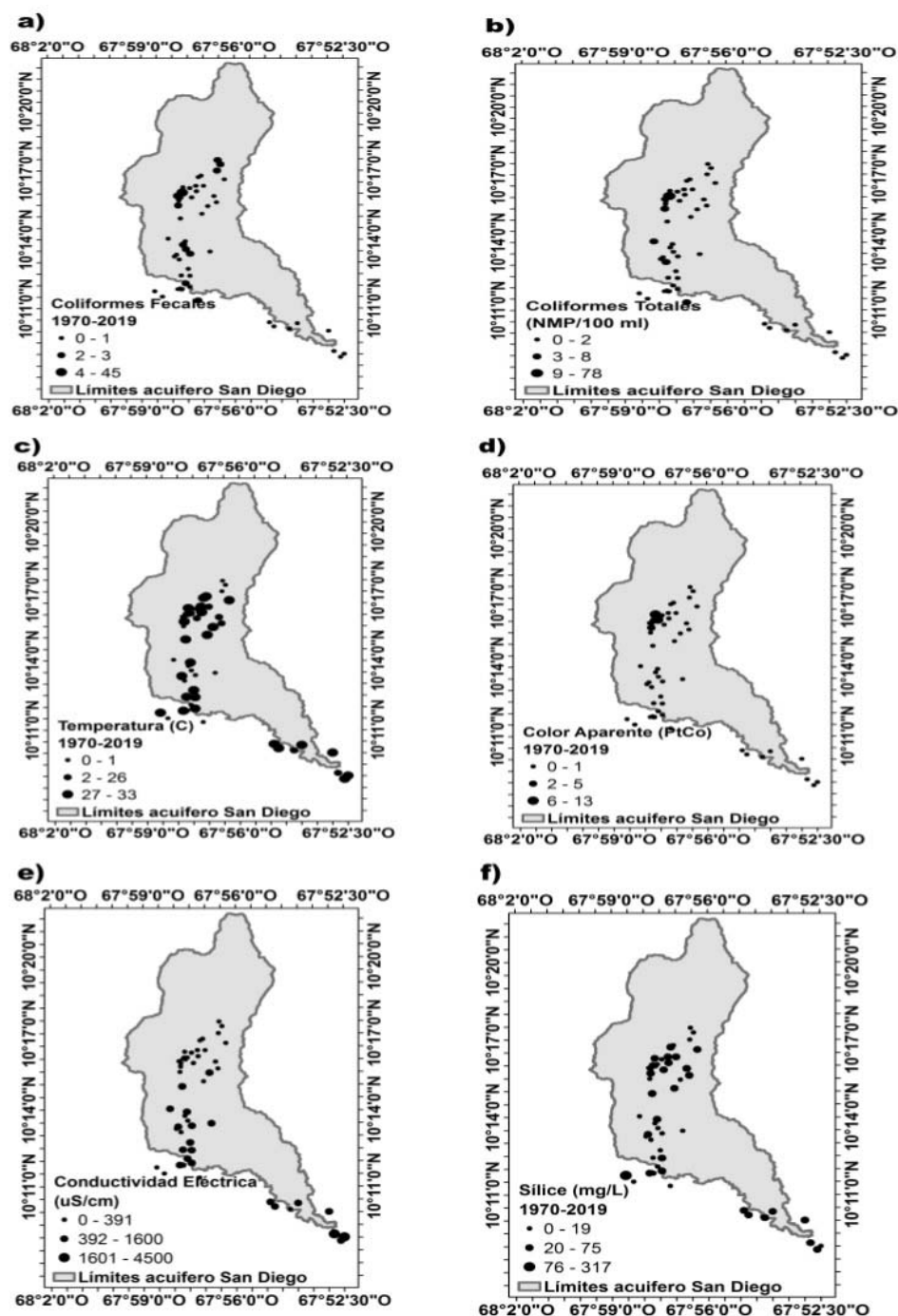


Figura 34: Distribución espacial de las propiedades de los parámetros físicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 1970-2019. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

La presencia de sustancias químicas en el agua del acuífero y su calidad, son consecuencia de la composición de los estratos que hacen contacto con el agua a partir de su infiltración en el suelo. Así el agua que pasa de una condición superficial a subterránea, varía su composición química al ir recibiendo compuestos minerales y al mismo tiempo ir perdiendo materia orgánica por su estrecho contacto o flujo a través del medio poroso que conforma el subsuelo.

Los parámetros de calidad obtenidos se comparan con los valores establecidos en el Decreto Nro. 3.219, sobre Normas para la clasificación y el control de la calidad de las aguas de la cuenca del Lago de Valencia, y en aquellos casos de parámetros no contemplados en ese decreto, se comparan con los valores dados en las Normas de Calidad del Agua Potable (Gaceta 36.395).

Tabla 9: Parámetros físico-químicos del agua en el acuífero y comparación con las normas de calidad de agua.

Parámetro	Valores medidos (rango)	Límite según Normas
Dureza total (mg/L)	52 – 618	500 (*)
Calcio (mg/L)	< 250	-
Cloruros (mg/L)	5 – 80	600 (*)
Sulfatos (mg/L)	40 – 461	400 (*)
Nitratos (mg/L)	0,1 - 18	10 (**)
Sólidos disueltos (mg/L)	87 – 1.384	1.500 (*)
Conductividad (μ S/cm)	188 – 2.340	-
pH	6 - 8	6,5 – 8,5 (**)
Coliformes totales (NMP/100 ml)	1,8 - 8	2.000 (*)

(*) Valores del Decreto 3.219; (**) valores de la Gaceta 33.395

Nota: cuadro elaborado por el autor con datos tomados de Márquez A. (2018) y Cordero (2017).

Dureza.

Dureza total. En primer lugar, los análisis obtenidos de la dureza total arrojan resultados que oscilan de 52 a 618 mg/L. Se observa que hacia el suroeste de la cuenca los valores tienden a ser mayores que hacia el centro y el norte. La mayoría de los pozos dan valores por debajo del límite de 500 mg/L del Decreto 3.219.

La dureza cálcica se encuentra entre no detectable y 295 mg/L. La dureza magnésica varía entre 22 y 232 mg/L.

Cloruros.

Los resultados de los análisis de las muestras indican concentraciones de cloruros en el rango de 5 a 80 mg/L, siendo los resultados más altos hacia el norte y en el extremo sur de la cuenca. Ya que el límite es de 600 mg/L en el decreto 3.219, y de 300 mg/L en las normas sanitarias del agua potable, se observa que es un parámetro que cumple completamente.

Sulfatos.

Varían desde 40 hasta 461 mg/L. Ya que el límite establecido en el decreto 3.219 es de 400 mg/L, se nota que en algunos casos se excede moderadamente, siendo éstos los correspondientes a pozos ubicados más al sur, en el municipio Los Guayos, más cerca del Lago de Valencia, mientras que los pozos ubicados en San Diego el nivel es más bajo y sí cumple con el límite. La consecuencia es que para pozos ubicados al sur del área de la cuenca, el agua no es apta para abastecimiento doméstico.

Nitratos.

Los valores obtenidos para este parámetro oscilan de no detectado a 18 mg/L. El decreto 3.219 indica como parámetro nitratos + nitritos como N que debe ser menor a 10 mg/L. Al igual que con los sulfatos, los valores más elevados de nitratos ocurren en el extremo sur de la cuenca, pero hacia el norte son mucho menores, no superando los 5 mg/L en ningún pozo de esa zona.

Calcio.

Se encuentran valores de 123 mg/L o menores. No existe regulación de este elemento en el Decreto 3.219.

Sodio.

Varía desde cero (no detectable) hasta 219 mg/L. Este valor máximo se encuentre en los pozos ubicados más al sur, ya en el municipio Los Guayos. No se menciona en el decreto 3.219 pero sí en las normas de agua potable, donde se establece que debe ser menor a 200 mg/L en el agua para consumo.

Sólidos disueltos.

Se encuentran valores entre 87 y 1.384 mg/L, siendo más elevado hacia el sur de la cuenca, cerca del Lago de Valencia. El límite del decreto 3.219 es de 1.500 mg/L, pero en las normas sanitarias de agua potable es de 1.000 mg/L, por lo que si se excede, pero se nota el mismo comportamiento que en otros parámetros de aumento de la mineralización del agua hacia el sur.

Conductividad.

Se encuentra entre 200 $\mu\text{mohs/cm}$ hacia el norte del acuífero y 2.340 $\mu\text{mohs/cm}$ hacia el extremo sur - este. Este parámetro no está regulado ni en el decreto 3.219 ni en las normas sanitarias de agua potable. Al relacionarse con la presencia de sustancias disueltas en el agua, los resultados indican que en el norte y centro del acuífero el agua tiene de bajas a moderadas concentraciones de minerales disueltos, pero al sur es más elevada, lo que se puede explicar por la intrusión del agua salobre del Lago de Valencia.

En resumen, la mayor parte de los parámetros físico – químicos del agua del acuífero posee variaciones espaciales, encontrando que el norte y centro del acuífero tiene valores menores o medios, y el extremo sur (pozos Nro. 26, 27 y 28) posee los mayores valores asociados con alta mineralización. La causa más probable es la intrusión del agua salobre del lago de Valencia hacia el acuífero, mayormente durante la época de sequía cuando no existe infiltración directa del agua de precipitación; mientras que hacia el norte y el perímetro montañoso de la cuenca hay recarga natural del acuífero con menor mineralización, probablemente de origen geológico.

En cuanto a las variaciones en el tiempo, según las cifras del trabajo de Márquez (2018), en el período analizado no son significativas dichas variaciones de los parámetros físico – químicos, debido a que se encuentran valores similares de cada parámetro desde el año 2.015 hasta el 2.018.



Figura 35: Distribución espacial de la clasificación del agua según diagrama de Piper – Hill – Langelier sobre especies iónicas: 1) Bicarbonato de Ca o Mg, 2) Bicarbonato de Na, 3) Sulfato o Cloruro de Ca o de Mg, 4) Sulfato o Cloruro de Na. (tomado de Márquez, 2018)

4.2 Resultados de la estimación de los parámetros geofísicos e hidráulicos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo.

4.2.1 Estimación de los parámetros geofísicos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo.

El conjunto de litologías recopiladas de los registros del Ministerio de Ecosocialismo ofrece una descripción del subsuelo en el área del acuífero en cada sitio donde se han perforado pozos profundos. La litología del suelo muestra características esenciales, ya que el tipo de suelo en cada nivel se asocia a la presencia de estratos acuíferos, acuitardos o acuicludos, y por consiguiente se relaciona con la condición de los estratos acuíferos como libres, confinados o semi-confinados.

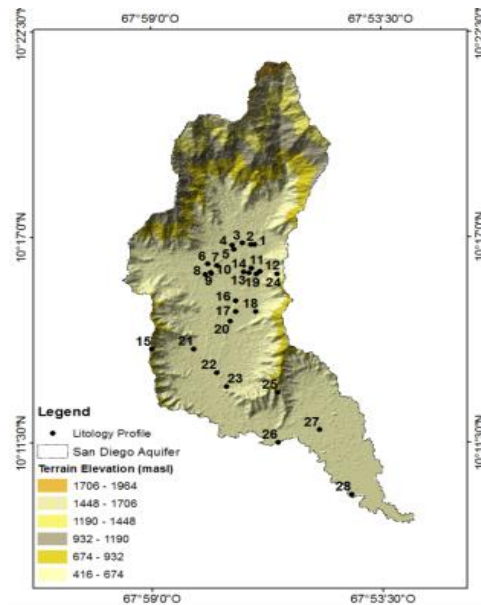


Figura 36: Identificación en el área del acuífero de 28 pozos con registro de perfiles litológicos, y datos de relieve (Márquez, 2018).

Teniendo en cuenta que las propiedades hidráulicas más importantes de un acuífero son la de almacenar agua y la de transmitirla, se presentan los valores de porosidad efectiva, el coeficiente de almacenamiento S , la conductividad hidráulica K y la transmisividad T .

En la Tabla 8 se presenta la lista de perfiles obtenidos con los datos de pozos registrados del Ministerio de Ecosocialismo, indicando en cada caso las litologías predominantes en orden descendente, dando el espesor total de los estratos permeables (no necesariamente contiguos) y la profundidad media de estos estratos. Aquí se observa en primer lugar la alternancia entre capas de materiales granulares permeables (SW arena bien gradada, GW grava bien gradada) y capas de materiales impermeables (CL arcilla de baja compresibilidad, ML limo de baja compresibilidad). Al detallar la ubicación de cada pozo se encuentra que los ubicados al norte de la cuenca poseen

principalmente material tipo CL y GW; en el centro y sur se encuentran estratos de CL y SW.

En la Tabla 8 se presentan los valores aproximados de porosidad efectiva y permeabilidad, basados en el trabajo de Márquez A. (2018), siendo estimados mediante la clasificación litológica de los estratos.

Tabla 10: Resumen de las litologías, porosidad efectiva y permeabilidad en 28 registros de pozos.

Perfil Nro.	Litologías predominantes *	Espesor de estratos permeables (m)	Profundidad de estratos permeables (m)	Porosidad efectiva	Permeabilidad K (m/día)
1	SM, SW, GW	38	62	0,36	900
2	CL, SM, GW, GC	13	34	0,36	1.100
3	CL, GW, GC, GC	10	33	0,36	1.000
4	CL, SW, GW	31	32	0,32	900
5	GW, ML, GW	28	22	0,30	1.000
6	SC, SM, CL	15	56	0,27	20
7	SM, SW, CL, GM	22	42	0,32	100
8	SC, CL, SW	13	75	0,33	100
9	CL, SC, GW, SW	15	67	0,36	1.000
10	CL, SW	16	123	0,30	11
11	CL, GW, CL	19	50	0,36	1.000
12	VL, SW, CL	20	40	0,30	100
13	CL, SW, GW, CL	15	50	0,33	1.000
14	VL, SW, GW, CL	50	36	0,30	1.000
15	CL, SW, GW, R	30	32	0,30	1.000
16	SM, SW, GW	40	37	0,32	1.000
17	SM, CL, R	-	-	0,25	10
18	SW, SC, GW, R	9	9	0,27	1.000
19	CL, GW, CL, GW	16	30	0,27	1.000
20	VL, SW, GW, GC	48	42	0,34	1.000
21	VL, CL, SW	20	30	0,30	1.000
22	SC, CL, SW, GW	24	70	0,30	-
23	CL, GW, CL, SW	18	34	0,32	-
24	SW, CL, GW, R	12	40	0,30	-
25	CL, GW, SW	14	40	0,32	-
26	CL, SW, GW	23	39	0,30	-
27	SW, GW, GC	30	40	0,32	-
28	SW, SC, CL	30	50	0,32	-

* Están en orden descendente

Nota: cuadro elaborado por el autor con datos tomados de Márquez A. (2018)

4.2.2 Estimación de los parámetros hidráulicos del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo.

Los resultados de las estimaciones de los parámetros hidráulicos del acuífero del Municipio San Diego son mostrados en la Tabla 9, Figuras 37-39, consistiendo de la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento dieron valores medios de 50.46 m²/día y 8.9×10^{-5} , respectivamente, presentando una alta variabilidad que estuvo asociada a la capacidad del equipo de bombeo usado en cada pozo, como se observó en la Figura 25, el caudal de bombeo se incrementó desde el sector norte hacia el sector industrial en el orden de 5 a 20 veces, lo que causó influencia sobre el incremento de la transmisividad del acuífero y una consecuente disminución del coeficiente de almacenamiento.

En la Figura 37 se observa que el coeficiente del almacenamiento resultó menor a 1×10^{-4} con una frecuencia de ocurrencia entre 60 y 70%. Según Bear y Cheng, (2011), el coeficiente de almacenamiento variando entre 1×10^{-4} y 1×10^{-5} corresponde a un acuífero confinado de tipo kárstico formado desde calizas y dolomías, lo que está en concordancia con los valores significativos encontrados para el bicarbonato de calcio, discutidos en la sección previa.

En la Figura 38 se observa que la transmisividad < 50 m²/día ocurrió con una frecuencia del 80%, según Bear y Cheng, (2011), la transmisividad variando entre 10 y 100 m²/día es un valor de muy baja a baja, la cual ocurrió en la zona con uso residencial del acuífero del Municipio San Diego (Figura 39).

Tabla 11: Resumen de los parámetros estadísticos de los coeficientes de transmisividad y almacenamiento en el acuífero del Municipio San Diego en el período 2015-2019. Fuente. Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

Parámetros Estadísticos	Transmisividad (T)	Coeficiente de Almacenamiento (S)
	m ² /día	
Conteo	20	20
Promedio	50.46	0.000089 = 8,9 x 10 ⁻⁵
Desviación estándar	125.20	0.00016
Coeficiente de variación	248.08%	189.14%
Mínimo	3.46	0
Máximo	570.72	0.00043
Rango	567.26	0.00043
Asimetría estándar	7.61	2.93
Curtosis estándar	16.44	0.64

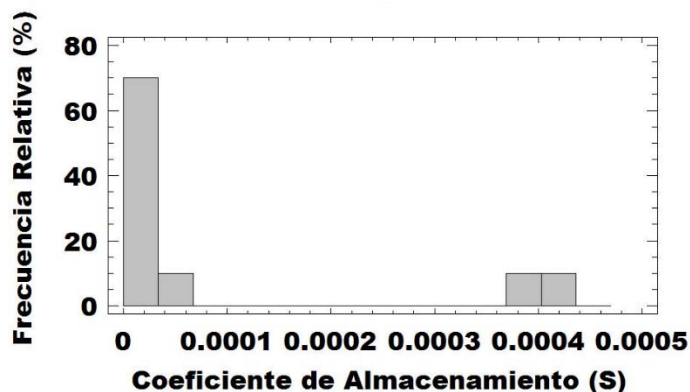


Figura 37: Frecuencia de ocurrencia del coeficiente de almacenamiento del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015-2018. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

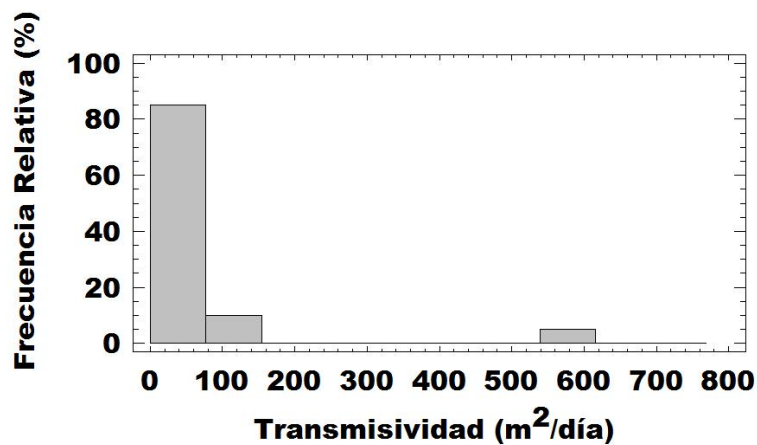


Figura 38: Frecuencia de ocurrencia del coeficiente de transmisividad del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015-2019. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

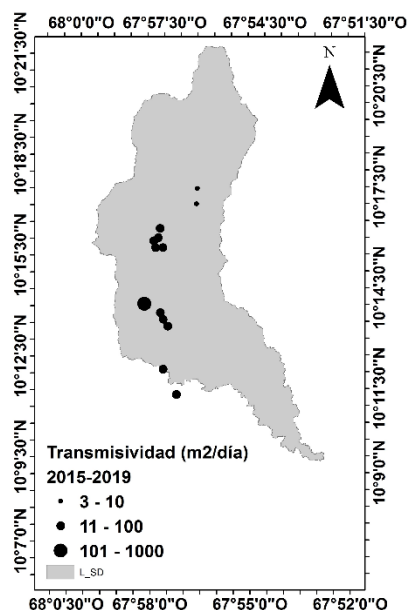


Figura 39: Distribución espacial del coeficiente de transmisividad del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015-2019. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2015a,b,c,d,e; 2016a,b,c,2017a,b,c,d,e,f, 2018a,b,c,d, 2019a,b; 2021

4.3 Estimación de los parámetros de balance del agua subterránea del acuífero San Diego en el período 2015-2018

Para este objetivo se analizan dos tipos de balance, siendo en primer lugar el hidrológico, enunciado en el principio:

$$\text{Flujo de entrada} - \text{Flujo de salida} = \text{Cambio de agua almacenada}$$

Según los resultados aportados por las fuentes consultadas, en el área del acuífero, durante el período de estudio, se han determinado valores de: precipitación, evapotranspiración, infiltración y caudal extraído por bombeo.

Precipitación, evapotranspiración e infiltración.

La siguiente tabla (Tabla 4 10) muestra en resumen cifras de precipitación en el área de la cuenca, calculados por Márquez A. (2018) a partir de los datos de estaciones hidrometeorológicas cercanas al área de estudio. Obtiene resultados por métodos geoestadísticos, con variaciones entre las zonas de la cuenca. De allí que se muestran valores mínimos, máximos y se calcula el valor acumulado en la cuenca con el promedio de ambos valores.

Tabla 12: Precipitación en el área del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, expresada en mm totales por mes.

Mes:	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	SUMA
Año 2015													
Mín:	3	6	0	21	35	25	106	168	128	74	50	18	634
Máx:	5	11	4	44	74	61	167	403	178	132	77	22	1.178
Año 2016													
Mín:	0	0	0	131	102	121	153	103	248	113	275	18	1.264
Máx:	1	1	4	201	165	239	168	223	231	142	311	21	1.707

Año 2017												
Mín:	7	0	11	197	114	291	270	-	-	-	-	890
Máx:	12	12	15	202	126	298	275	-	-	-	-	940

Nota: cuadro elaborado con datos tomados de Márquez A. (2018)

En la Figura 40 se muestra la variabilidad de los valores de las precipitaciones ocurridas en el acuífero del Municipio San Diego durante el año 2015, estimadas mediante el método de Krigging Ordinario (Márquez et al., 2019), observando la ocurrencia de una variabilidad baja en los meses secos que se incrementa en los períodos de transición desde la temporada seca a la lluviosa y viceversa. Así mismo, el patrón observado es típico del clima tropical, en el cual los meses secos corresponden a noviembre – marzo, mientras que la temporada de lluvia abarca desde mayo hasta octubre de cada año.

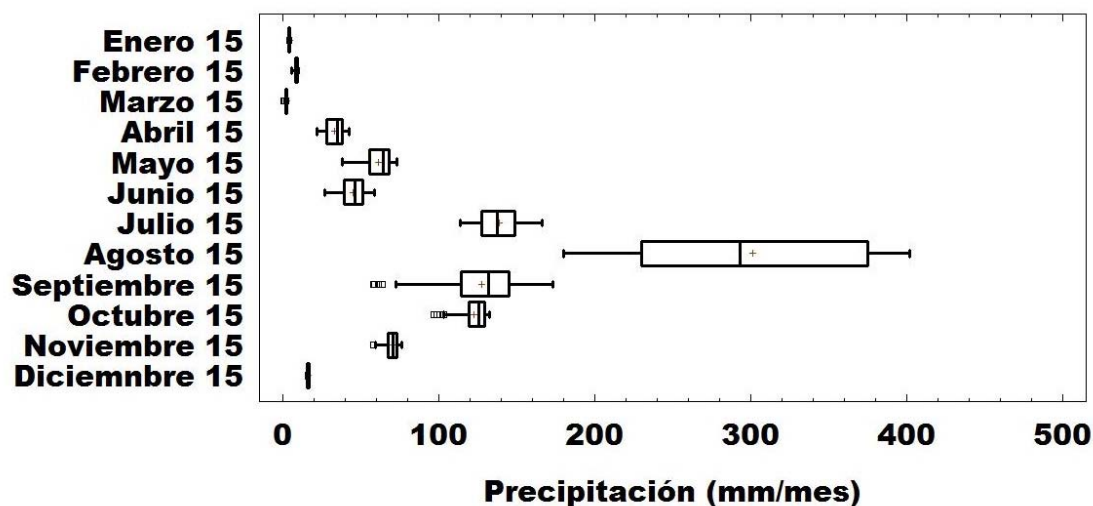


Figura 40: Diagrama de cajas y bigotes de la precipitación en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2018e,f

De la tabla 10, promediando el mínimo y máximo, resulta para los años:

- Año 2015, precipitación anual: 906 mm
- Año 2016, precipitación anual: 1.486 mm

- Año 2017, precipitación enero – julio: 915 mm

De la misma fuente se encuentran valores detallados de evapotranspiración, calculados mensualmente. A continuación se presentan los valores de la evapotranspiración potencial en el área de la cuenca.

En la Figura 41 se muestra la variabilidad dentro de los valores de evapotranspiración ocurridos en el acuífero del Municipio San Diego durante el año 2015, como una muestra, estimados mediante el método de Krigging Ordinario (Márquez et al., 2019), observando la ocurrencia de los más altos valores durante los meses secos, disminuyendo y tendiendo a ser constante durante la temporada lluviosa.

Tabla 13: Evapotranspiración en el área del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, expresada en mm totales por mes.

Mes:	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	SUMA
Año 2015													
Mín.:	115	170	151	157	162	123	128	137	117	132	137	109	1.638
Máx:	123	174	155	158	167	128	132	147	119	134	143	115	1.695
Año 2016													
Mín:	141	137	185	138	117	122	142	122	98	121	85	90	1.498
Máx:	142	138	188	141	122	125	144	125	103	125	86	91	1.530
Año 2017													
Mín:	29	80	105	85	108	116	122	-	-	-	-	-	645
Máx:	64	90	124	97	113	121	123	-	-	-	-	-	732

Nota: cuadro elaborado con datos tomados de Márquez A. (2018)

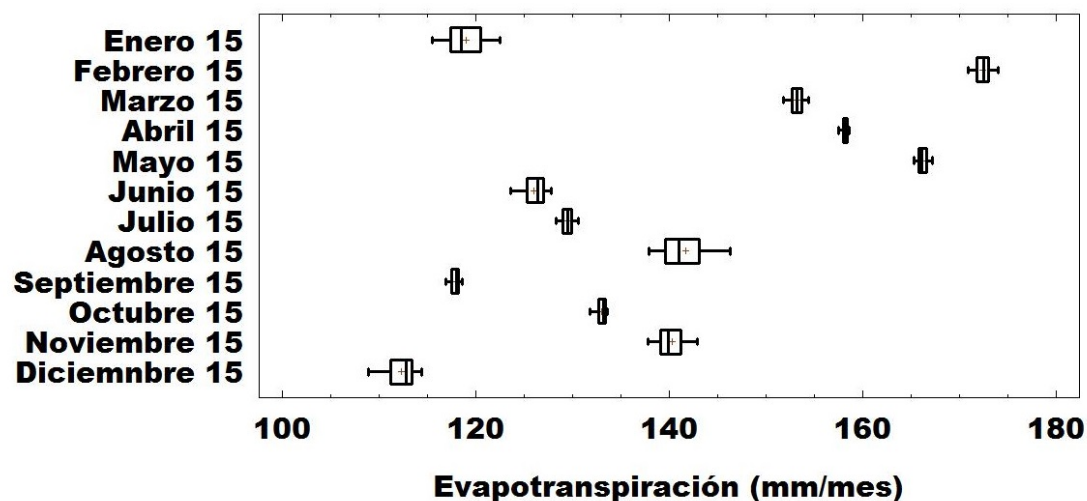


Figura 41: Diagrama de cajas y bigotes de la evapotranspiración en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2018e,f

La infiltración para el área de estudio se muestra en la siguiente tabla (datos obtenidos de Márquez A., 2018). La variabilidad de usos de la tierra incide directamente en el cálculo de la infiltración, siendo menores sus valores en el área urbana de la cuenca, y mayores en el sur – este de la misma.

Tabla 14: Infiltración en el área del acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, expresada en mm totales por mes.

Mes:	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	SUMA
Año 2015													
Mín:	1	3	0	20	25	33	33	36	21	30	26	15	244
Máx:	5	9	4	34	46	79	67	79	67	61	51	21	523
Año 2016													
Mín:	0	0	0	0	31	33	33	34	30	30	34	15	240
Máx:	1	1	3	4	60	68	68	76	60	60	75	20	496
Año 2017													
Mín:	33	0	11	33	113	34	34	-	-	-	-	-	258
Máx:	69	11	15	69	126	74	79	-	-	-	-	-	443

Nota: cuadro elaborado con datos tomados de Márquez A. (2018)

En la Figura 42 se muestra que la infiltración ocurrida durante el año 2015 reprodujo el comportamiento de la lluvia, según la cual los valores más altos ocurren durante la temporada de lluvia.

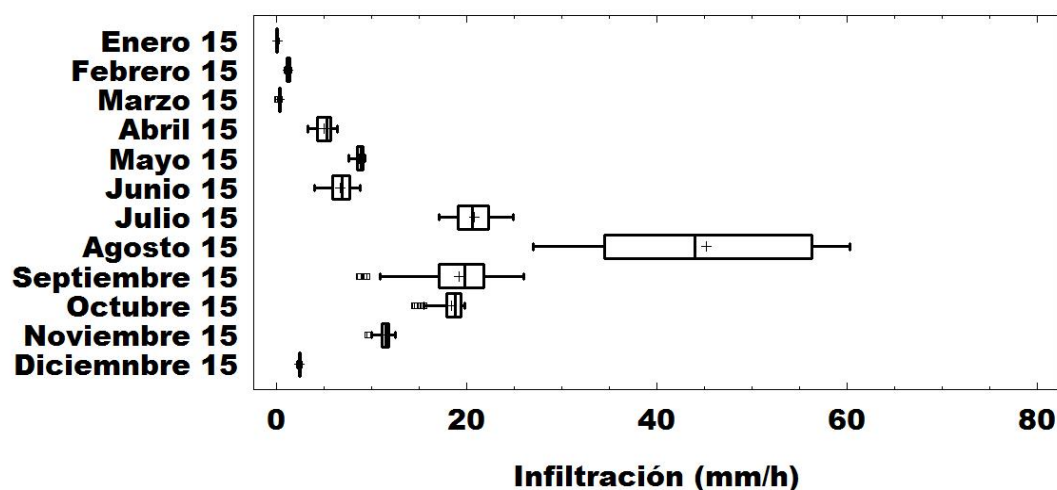


Figura 42: Diagrama de cajas y bigotes de la infiltración en el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2018e,f

Calculando el promedio del total anual mínimo y máximo se obtiene:

- Año 2015, infiltración anual: 384 mm
- Año 2016, infiltración anual: 368 mm
- Año 2017, infiltración enero – julio: 350 mm

Tabla 15: Volumen extraído con pozos profundos desde el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo, expresado en m³/año.

AÑO	Volumen extraído (m ³ /año)	Caudal promedio (L/seg)
2.015	12.976.938	411,5
2.016	12.597.560	399,5
2.017	13.261.203	420,5
2.018	12.944.620	410,5

Nota: cuadro elaborado con datos tomados de Márquez A. (2018) e Hidrocentro.

En la Figura 43 se muestra que el caudal de bombeo resulto tendiendo a ser constante durante los meses del año 2015 indicando que existe una extracción mensual tendiendo a ser constante desde los pozos del acuífero del Municipio San Diego, aproximadamente igual a 5 L/s.

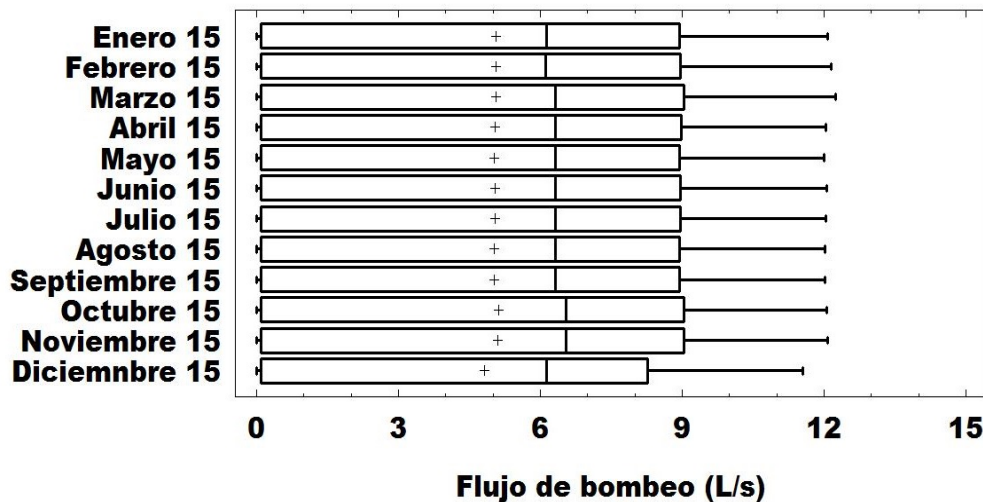


Figura 43: Diagrama de cajas y bigotes del flujo de bombeo desde el acuífero del Municipio San Diego, Estado Carabobo durante el período 2015. Fuente: Elaboración propia. Adaptado desde Márquez et al., 2018e,f

El balance de la cuenca se puede expresar con la ecuación 2.5, la cual establece que el aporte por precipitación (en un período de tiempo determinado) debe ser igual a la suma de la escorrentía más la evapotranspiración más la infiltración. Algunos autores (Lesser C., 2011) determinan la infiltración con los otros componentes. Se considera que los datos disponibles en las fuentes consultadas no permiten realizar un cálculo preciso de los componentes del balance, principalmente por la ausencia de datos de escorrentía superficial, que para esta cuenca corresponde al río San Diego, quedando indeterminada la ecuación de balance. Sin embargo, los mismos datos muestran el orden de magnitud de componentes esenciales del balance.

4.4 Análisis de la influencia de los constituyentes hidro-geoquímicos del acuífero sobre el uso sustentable del agua.

Como ya se estableció en el capítulo II, para establecer el uso sustentable del agua subterránea se debe considerar: a) disponibilidad del recurso hídrico, b) tasa de extracción y rendimiento seguro, c) calidad, d) protección ambiental de las áreas de recarga, e) la planificación del sistema de abastecimiento sobre la base de la gestión integrada del recurso.

Disponibilidad del recurso hídrico.

Sobre la base del concepto de porosidad efectiva y de permeabilidad, se puede hacer un estimado del volumen de agua subterránea potencialmente extraíble, lo cual es la base del cálculo de la disponibilidad.

Los perfiles litológicos, de porosidad efectiva y de permeabilidad obtenidos de las fuentes consultadas indican que el acuífero consta en realidad de varias capas, de distinta composición, por lo tanto un medio que en toda su extensión resulta bastante heterogéneo. De modo que el cálculo del volumen del acuífero y su volumen de agua es una aproximación valiosa para conocer la disponibilidad. En el siguiente cálculo se toma el valor promedio de espesor de capa permeable de la Tabla 8.

Estimación del volumen almacenado.

1. Área total del acuífero: $Aa = 117 \text{ Km}^2$
2. Espesor promedio de acuífero hac. Se toma del promedio de los espesores de la tabla 2:

$$h_{ac} = 23 \text{ m}$$

3. Volumen total del acuífero

$$V_{ac} = 117 \times (10^6 \text{ m}^2/\text{Km}^2) \times 23 \text{ m} = 26,91 \times 10^9 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen } V_{ac} = 26.910 \text{ Km}^3$$

4. Porosidad total = entre 12 y 40%

5. Porosidad eficaz = 0,32

6. Volumen de agua que puede almacenar el acuífero:

$$V_a = 26.910 \text{ Km}^3 \times 0,32 = 8.611 \text{ Km}^3$$

7. Recarga estimada = infiltración. De los datos del balance, se tiene que la infiltración total en un año es en promedio de 370 mm/año. Esto equivale a un volumen:

$$\text{Vol. Agua recibe} = 0,37 \text{ m/año} \times 117 \times 10^6 \text{ m}^2 = 43,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

Si se la extracción fuese la misma que la entrada de recarga, la tasa de extracción máxima sería:

8. $Q_{\max} = 43,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} \times (1/(12 \text{ meses} \times 30 \text{ días} \times 24 \text{ hr}))$

$$= 5.010 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$Q_{\max} = 1.390 \text{ L/seg}$$

Se observa que ese caudal es mucho mayor que la extracción actual con los pozos profundos activos.

Tasa de extracción.

No hay un criterio único para establecer cuánto es la tasa de extracción que implica un equilibrio o balance entre la entrada de agua o recarga y la extracción. Teóricamente, si se bombearan 1.390 L/seg, todos los años, se repondría ese volumen por la recarga y el nivel de agua del acuífero tendería a

mantenerse estable. Pero la realidad es que el acuífero como sistema tiene las siguientes características: a) es heterogéneo en toda su extensión; b) la extracción por bombeo utiliza agua de diversas capas acuíferas, que pueden ser de los tres tipos: libres, confinadas y semi-confinadas, lo cual implica diferentes efectos en el abatimiento del nivel piezométrico; c) la velocidad de recarga es desconocida, pero la existencia de capas impermeables alternadas con las de acuífero implica que los tiempos de recarga del acuífero confinado deben ser muy prolongados, del orden de décadas o cientos de años.

Por otro lado, se revisa la demanda de agua del sistema de acueducto en el área de estudio y su comparación con el aporte de agua subterránea y de agua del sistema principal.

Las demandas de agua potable para el área del acuífero se basan en los datos de población obtenidos del INE, con una tasa de crecimiento aritmético del 4% anual. Se calcula con el valor de consumo per-cápita recomendado en las normas INOS, de 300 litros/persona-día (L/p-d).

Tabla 16: Población y demanda futuras en San Diego.

AÑO	POBLACIÓN	DEMANDA L/seg
2018	140.000	486
2020	151.200	525
2025	179.200	622

Nota: cuadro elaborado con datos tomados de Sánchez J. (2013)

Calidad del agua extraída.

La calidad del agua que se extrae en el norte y centro del área del acuífero es buena, permitiendo clasificarla en el tipo 1A, e inclusive clasificarla como “potable” según las normas sanitarias, previa desinfección. Esto hace que se pueda considerar apropiada la extracción del agua subterránea para incorporarla directamente a las redes de acueducto de San Diego, confirmando uno de los requisitos para que sea sustentable su explotación. En cambio, los niveles de mineralización hacia el extremo sur del acuífero no se corresponden con el uso para abastecimiento urbano.

Gestión integrada del recurso hídrico

Los resultados de esta investigación en cuanto a las características hidro-geológicas del acuífero, la calidad del agua y su disponibilidad, permiten proponer un modelo de gestión para el aprovechamiento del agua subterránea en forma integrada con el sistema de abastecimiento del municipio San Diego proveniente del Sistema Regional del Centro. Está comprobado que actualmente se usan ambas fuentes de agua, pero no de forma planificada e integrada.

La producción de los pozos profundos actualmente atiende a las necesidades de algunos particulares, urbanizaciones o empresas que no reciben regularmente agua del sistema principal y que por lo tanto, ya sea por la empresa hidrológica, el gobierno local o el regional, o a modo propio, han construido sus pozos profundos y así tienen esta fuente alterna solamente. Por eso, el caudal proveniente de los pozos, en su mayoría, se incorpora en forma sectorizada a porciones de las redes de distribución, sin opción para redistribuir esos caudales (Sánchez J., 2013).

Es importante señalar que la producción total de los pozos profundos por el orden de 400 L/seg., no llega a cubrir el abastecimiento previsto para la población, superior a los 500 L/seg., por lo que actualmente no se puede prescindir del abastecimiento de agua de San Diego por el Sistema Regional del Centro. A través de este sistema se tiene un aporte muy variable que promedia los 250 L/seg durante los períodos de bombeo. Pero este bombeo se realiza en ciclos de 72 a 96 horas como máximo, cada semana, de las 168 horas de una semana, por lo que 250 L/seg equivale en realidad a un promedio de 110 a 180 L/seg.

En definitiva, deben realizarse más estudios sobre el aporte del agua subterránea que se encuentra en la misma área para integrarla apropiadamente en el abastecimiento de agua de la zona, dado que su calidad resulta apta para este uso.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Los resultados de este trabajo han mostrado que en la cuenca existe una diversidad de condiciones hidro-geológicas del sub-suelo, viendo que su litología y otras características físicas no son uniformes en todos los sitios estudiados. Dentro de la variedad propiedades se encuentra que el subsuelo, en un recorrido vertical, se caracteriza por tener alternancia de estratos permeables, semipermeables e impermeables, concluyendo que el acuífero comprende un conjunto de capas acuíferas semi-confinadas y confinadas.

Respecto a la calidad del agua se concluye que es factible la extracción e incorporación del agua subterránea a las redes locales de acueducto en el área de estudio, el municipio San Diego, requiriendo solamente de su desinfección previa, por estar dentro del rango del tipo IA.

Los resultados de los estudios realizados en el período 2015 a 2018 muestran que no es significativa la variación en el tiempo de los constituyentes hidrogeológicos y físico-químicos, aunque se trata de un período breve, implica condiciones estables en la hidrología y composición del acuífero. En cambio, es notable la variación espacial de estos parámetros, resaltando la diferencia en la calidad del agua proveniente del norte y centro de la cuenca, que es de tipo 1A, con respecto a la de los pozos situados más al sur, donde la elevada presencia de minerales y otros constituyentes implica que no es tipo apta para incorporarla directamente al abastecimiento de agua.

Respecto al balance hidrogeológico, se considera que los datos disponibles en las investigaciones consultadas no permiten realizar un cálculo preciso de los componentes, principalmente por la ausencia de datos de escorrentía superficial, que para esta cuenca corresponde al río San Diego, quedando indeterminada la ecuación de balance.

El balance de los aportes de agua para abastecimiento urbano en el área de San Diego permite establecer que bajo las condiciones actuales no se puede prescindir del aporte de agua subterránea, ya que el Sistema Regional del Centro suple en forma irregular sólo la mitad de la demanda promedio. Los pozos profundos existentes actualmente han sido construidos para satisfacer necesidades puntuales de urbanismos o de ciertos sectores o de industrias, cumpliendo con ese rol hasta el momento, pero se debe plantear la manera de que esos caudales puedan distribuirse a toda la red, bajo la administración de la empresa hidrológica o la autoridad municipal.

Así, la fuente subterránea tiene condiciones para complementar dicha demanda en forma sustentable, pero la forma en que se utiliza actualmente no está basada en un apropiado modelo de gestión integrada de ambos suministros.

Recomendaciones

El Plan de Desarrollo Urbano Local del municipio San Diego, en lo referente a abastecimiento de agua deberá incorporar un sistema de gestión integrada que considere la existencia de los pozos profundos y su rol primordial como complemento y uso combinado del sistema principal, incluyendo los estudios hidro-geológicos correspondientes para regular la

explotación del acuífero en forma sustentable. Adicionalmente se deben proseguir los estudios de campo para lograr un mayor conocimiento de los componentes hidrogeológicos.

Se requiere ampliar la investigación sobre los aspectos de recarga del acuífero y los riesgos que pueden perjudicar la cantidad y calidad de dicha recarga.

Se recomienda estudiar un rediseño del sistema de abastecimiento y reingeniería del sistema de distribución para que sea posible integrar convenientemente los caudales que aportan el suministro subterráneo y el SRC, que permita el uso alternativo complementado de ambas fuentes, teniendo presente que la gestión integrada y sustentable de la fuente subterránea.

REFERENCIAS

1. APHA, 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd edition edited by E. W. Rice, R. B. Baird, A. D. Eaton and L. S. Clesceri. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), Washington, D.C., USA.
2. ANSI/AWWA A100, (1997). Water wells. American Water Works Association. Disponible en: <https://www.standardsportal.org/usa/en/sdo/awwa.aspx>
3. Bear, J. & Cheng, A. (2010): *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. London, England. Springer.
4. Bolinaga, J.J. (Editor). (1999): *Proyectos de Ingeniería Hidráulica*. Tomos I y II. Caracas. Fundación Polar.
5. CARE Internacional – Avina (2012): *Programa Unificado de Fortalecimiento de Capacidades. Módulo 8: Gestión Integrada del Recurso Hídrico*. Care Internacional, Cuenca, Ecuador.
6. Collazo C. María P. y Jorge Montaña X. (2012): *Manual de agua subterránea*. Ministerio de Agricultura y Pesca. Montevideo, Uruguay.
7. Cunningham, W. L., & Schalk, C. W. (2011). Groundwater technical procedures of the US Geological Survey. US Geological Survey Techniques and Methods 1–A1.
8. Decreto Nro. 3.219, *Normas para la clasificación y control de la calidad de las aguas de la cuenca del Lago de Valencia*. Enero de 1999, Gaceta Oficial de la República de Venezuela Nro. 5.305 extraordinario. Caracas.

9. Díaz Delgado, C., María V. Esteller A. y Fernando López-Vera (2005): *Recursos Hídricos, conceptos básicos y estudios de casos en Iberoamérica*. Editores los autores, Universidad Autónoma del Estado de México, México.
10. Escobar Villagrán, Bernardo S. y Palacios V., Oscar L. (2012): *Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco, México*. Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. III, nro. 2, Abril – Junio de 2012.
11. Guevara, E. (1990). Ingeniería de riego y drenaje. Consejo de desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo. República Bolivariana de Venezuela.
12. Guevara P., E (2000). Diagnóstico de la situación ambiental y ecológica del Estado Carabobo. Revista Ingeniería UC, 7(1).
13. Guevara, E., & Cartaya, H. (2004). Hidrología ambiental. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.
14. Goovaerts, P., Webster, R., & Dubois, J. P. (1997). Assessing the risk of soil contamination in the Swiss Jura using indicator geostatistics. *Environmental and ecological Statistics*, 4(1), 49-64.
15. González de Vallejo, Luis, Mercedes Ferrer, Luis Ortuño y Carlos Oteo (2004): *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación. Madrid, España.
16. Hengl, Tomislav (2007): *A Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables*. Joint Research Center of European Commission and Institute for Environment and Sustainability.
17. Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. Sexta edición. México DF McGraw Hill.

18. Isaaks, E. H., & Srivastava, M. R. (1989). Applied geostatistics (No. 551.72 ISA).
19. ISO/IEC 17025:2017 (2017). Norma Internacional 17025. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. International Organization for Standardization (ISO)-International Electrotechnical Commission (IEC). Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-3:v1>
20. Johnson Division (1975): *El agua subterránea y los pozos*. Edward F. Johnson, INC., Saint Paul, Minnesota, USA.
21. Kirsch, R. (2006). Groundwater geophysics (Vol. 493). Berlin: Springer.
22. Lesser Carrillo, Luis E; Juan Lesser Illades, Santiago Arellano Islas y David González Posadas (2011): *Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del valle del Mezquital, México Central*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 28, núm. 3, 2011, p. 323-336. México.
23. Ley de Aguas (2007). Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela, Gaceta Oficial Nro. 38.595, Enero 2007. Caracas.
24. Llamas, Ramón; Hernández-Mora, Nuria y Martínez C. Luis (2000): *El uso sostenible de las aguas subterráneas*. Madrid, España: Fundación Marcelino Botín, Madrid; se encuentra en: http://www.fundacionbotin.org/89dguuytdfr276ed_uploads/Observatorio%20Tendencias/PUBLICACIONES/MONOGRAFIAS/PAS/PAS1.pdf
25. Masters, Gilbert. y Wendel, E. (2008): *Introducción a la Ingeniería Medioambiental*. 3ra Edición. Madrid. Pearson Educación.
26. Márquez A., Absalón O., Bravo R., (2021). Análisis de la variación de los parámetros hidráulicos en el acuífero del municipio san diego, sector norte

- c, pozo n° 2, coord. Lat.: 10°16'0.30"n; Long: 67°57'42.68"o, periodo 2019. Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
27. Márquez A., Cejas E., Sánchez F. (2019a) Análisis de la variación de los parámetros hidráulicos en el acuífero del municipio san diego, sector norte – c, pozo n°6. Coord. Lat.: 10°15'42.4"n; Long: 67°57'47.7"o, periodo 2018-2019. Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
28. Márquez A., García E. Cárdenas M., (2019b). Análisis de la variación de los parámetros hidráulicos en el acuífero del municipio san diego, sector norte – c, pozo n° 1, coord. Lat.: 10°16'1.91"n; Long: 67°57'34.30"o, período 2019. Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
29. Márquez A., Flores A., Urdaneta S., (2018a). Análisis de la variación de los parámetros hidráulicos en el acuífero del municipio san diego, sector centro-b. período 2018. Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
30. Márquez A., Monsalve G., Villareal H., (2018b). Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del municipio san diego durante 2018. Caso: sector centro a. Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
31. Márquez A., Martín P., Álvarez Y., (2018c). Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del municipio san diego durante 2018. Caso: sector centro A. Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
32. Márquez A., Guevara E., Rey D., (2018e). Spatio-Temporal Forecasting Model of Water Balance Variables in the San Diego Aquifer, Venezuela. Journal of Remote Sensing GIS & Technology Volume 4 Issue 3. <http://matjournals.in/index.php/JORSGT/article/view/2864>
33. Márquez, A. M., Guevara, E., & Rey, D. (2018f). Spatio-temporal Geostatistical Modeling of Hydrogeochemical Parameters in the San Diego

Aquífer, Venezuela. Journal of Remote Sensing GIS & Technology, Volume 4 Issue 3. <http://matjournals.in/index.php/JORSGT/article/view/2799>

34. Márquez A., Carrizales A., Urdaneta L, (2017a). Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del municipio san diego durante 2017. Caso: sector centro Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo.
35. Márquez A., Montilla A., Quiñonez A., (2017b). Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del municipio san diego durante 2017, caso: sector industrial Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
36. Márquez A., Delgado C., Vera A., (2017c). Estimación de parámetros hidráulicos en el acuífero del municipio san diego, estado Carabobo en el año 2017. Caso: sector zona industrial Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
37. Márquez A., Quintero G. y Romero M. (2017d): *Evaluación del proceso de descarga - recarga del acuífero, Municipio San Diego del Estado Carabobo*. Tesis de pregrado no publicada. Naganagua. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil.
38. Márquez A., Segura J. y Rodríguez M. (2017e): *Estimación de los parámetros hidro-geoquímicos del acuífero de San Diego, caso período lluvioso 2017*. Tesis de pregrado no publicada. Naganagua. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil.
39. Márquez A., Cordero. P. J. C. y Jiménez. R. M. J. (2017f): *Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del Municipio San Diego durante 2017, caso: Sector Norte*. Tesis de pregrado no publicada. Naganagua. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil.

40. Márquez A., Farías Y., Vallejo M., (2016a). Elaboración de mapas de propiedades hidrogeoquímicas del acuífero del municipio San Diego del estado Carabobo durante el año 2015, caso sector norte B Y C". Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
41. Márquez A., Palma Sánchez, M. V., & Vegas Amaya, D. E. (2016b). Estimación de parámetros hidráulicos del acuífero del municipio San Diego 2016: zona norte, Estado Carabobo. (Bachelor's thesis). <http://www.riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/5465>
42. Márquez A., Hernández C., Vázquez F., (2016c). Estimación de parámetros hidráulicos en el acuífero del municipio san diego, estado Carabobo en el año 2016, sector zona industrial Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
43. Márquez A., Mercado A., Rodríguez R., (2015a). Elaboración de mapas de propiedades hidrogeoquímicas del acuífero del municipio san diego durante el año 2014. Caso: zona centro A, B Y C. Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
44. Márquez A., Daza B., Terán F., (2015b). Elaboración de mapas de propiedades hidrogeoquímicas del acuífero del municipio San Diego durante el año 2014 (caso: sector sur y zona industrial). Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
45. Márquez A., García B., Mendoza E., (2015c). .Elaboración de mapas de propiedades hidrogeoquímicas del acuífero del municipio san diego del Estado Carabobo durante el año 2015. Caso de estudio: sector norte A Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo
46. Márquez A., Jiménez L., Cruz E., (2015d). Elaboración de mapas de propiedades hidrogeoquímicas del acuífero del municipio san diego durante

el año 2015. Caso: zona centro Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo

47. Márquez A., García R., Ramírez E., (2015e). Elaboración de mapas de propiedades hidrogeoquímicas del acuífero del municipio San Diego del Estado Carabobo durante el año 2014, caso sector norte. Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo.
48. Márquez A., Rivero J. (2015f). Elaboración de mapas de propiedades hidrogeoquímicas del acuífero del municipio San Diego, Estado Carabobo durante el año 2015. Caso: sector industrial. Tesis de pregrado. Universidad de Carabobo.
49. Márquez A., Carrillo Flores, V. E. (2015). Vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero del municipio de San Diego, estado Carabobo. (Master's thesis). <http://www.riuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/123456789/2420/1/vcarrillo.pdf>
50. Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 58, 1246–1266.
51. Merkel, B. J., Planer-Friedrich, B., & Nordstrom, D. K. (2005). Groundwater geochemistry. A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems.
52. Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable. Gaceta Oficial Nro. 36.395, febrero 1998. Ministerio de Sanidad y Asistencia Social. Caracas.
53. Norma Técnica Colombiana, 5539 (2007). Pozos profundos de agua. ICONTEC. Disponible en: <https://www.icontec.org/rules/pozos-profundos-de-agua/>
54. Padilla, Francisco (2012): *Ingeniería Geológica. Unidad 5, Capítulo 11*. Curso Universidad de A. Coruña. Tomado de: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_tecic/211/algloki/pdfs/Unidd%20V%20-%20Ingenier%EDa%20Geol%F3gica.pdf

55. Rocha Felices, Arturo (1993): *Recursos Hidráulicos*. Capítulo de Ingeniería Civil del Consejo Departamental de Lima, Perú.
56. Sánchez, Julieta (2013): *Reingeniería de la aducción de agua potable comprendida desde la estación de bombeo Castillito, municipio San Diego, estado Carabobo*. Proyecto contratado por la Gerencia de Proyectos e Inspección de la C.A. Hidrológica del Centro (Hidrocentro). Guacara, Venezuela.
57. Sánchez San Román, Francisco Javier (2014): *Conceptos fundamentales de hidrogeología*. Universidad de Salamanca, España. Consultado en <http://hidrologia.usal.es>
58. Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 16(2), 519-524.
59. USGS (1999): *Sustainability of groundwater resources*. US Geological Service circular 1186. Denver, Colorado. By William Alley, Thomas Reilly, O. Lehn Franke.
60. Villarroja, Francisco (2009): Jornadas Técnicas Sobre Aprovechamiento de Aguas Subterráneas para Riego: *Tipos de Acuíferos y Parámetros Hidrogeológicos*. Centro Nacional de Tecnología de Regadíos CENTRE. Madrid.
61. WERNER, Joerg. (1996): *Introducción a la Hidrogeología*. Linares, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.

ANEXOS