

Evaluación de la influencia del balance de constituyentes hidrogeoquímicos en el uso sostenible del agua

Evaluating influence of hydrogeochemical constituents balance on water sustainable use

Gerardo Huguet  ¹

Adriana Márquez  ²

Edilberto Guevara  ³

Sergio Pérez  ⁴

Eduardo Buroz  ⁵

Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales, Carabobo, Venezuela^{1,2,3,4}
Universidad Central de Venezuela, Universidad Católica Andrés Bello, Academia Nacional de
Ingeniería y Hábitat, Caracas, Venezuela⁵

gerardohuguet@gmail.com¹

ammarquez@uc.edu.ve²

eguevara@uc.edu.ve³

sperez@uc.edu.ve⁴

eduardo.buroz@gmail.com⁵

Fecha de recepción: 24/03/2024

Fecha de aceptación: 28/05/2024

Pág: 50 – 94

DOI: [10.5281/zenodo.18186158](https://doi.org/10.5281/zenodo.18186158)

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo analizar los constituyentes o parámetros hidrogeológicos, físicos y químicos del acuífero de San Diego, Venezuela, para caracterizarlo y determinar su influencia en el uso sustentable del agua subterránea para el abastecimiento de la población que habita en el municipio de San Diego, estado Carabobo, Venezuela. El municipio de San Diego cubre la mayor parte del área del acuífero, y es una zona de alto desarrollo urbano que requiere suministro de agua subterránea debido al déficit del suministro principal asociado al Sistema Regional Central. El acuífero es un conjunto de estratos geológicos ubicados dentro de límites de la cuenca del río San Diego, que es capaz de almacenar agua subterránea y transmitirla. Se investigaron datos de litología, porosidad, nivel de bombeo, que permiten calcular una estimación del volumen de agua disponible en el acuífero.



Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

En cuanto a calidad del agua, 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, mientras que hacia el extremo sur, ésta es de menor calidad, donde los parámetros minerales son mayores, relacionado con una probable intrusión del agua salobre del lago de Valencia. Se concluye estableciendo que el volumen de agua subterránea, su disponibilidad, viabilidad de extracción y su calidad la hacen apta para el abastecimiento urbano y que la extracción es sostenible. Aunque se debe diseñar una mejor gestión integrada, considerando el aporte del Sistema Regional del Centro y adecuación de redes de distribución.

Palabras clave: acuífero de San Diego, componentes hidrogeoquímicos, uso sustentable.

Abstract

The present work aims to analyze and interpret the constituents or hydro-geological, physical and chemical parameters of the San Diego aquifer, to characterize it and determine its influence on the sustainable use of groundwater for supplying the population that inhabits the San Diego municipality, Carabobo State, Venezuela. The San Diego municipality covers most of the aquifer area, and is an area of high urban development that currently requires groundwater supply due to the deficit of the main supply associated to the Central Regional System. The aquifer is a set of geological strata located within the limits of the San Diego River basin, which is capable of storing groundwater and transmitting it. Data on lithology, porosity, pumping level were investigated, which allow to calculate an estimate of the volume of available water in the aquifer. Regarding water quality, data on hardness, chlorides, sulfates, nitrates, conductivity, calcium, magnesium, pH, show that the water towards the center and north of the aquifer is of good quality, while towards the extreme south, this is of lower quality, where the mineral parameters are higher, which is related to probable intrusion of the brackish water of the Valencia Lake. It is concluded by establishing that the volume of groundwater, its availability, extraction feasibility and its quality make it suitable for urban supply and that the extraction is sustainable. Although a better integrated management must be designed, considering the contribution of the Center's Regional System and the adaptation of the distribution networks.

Key words: San Diego aquifer, hydrogeochemical constituents, sustainable use.

Introducción

La disponibilidad de agua está disminuyendo con el tiempo y la crisis hídrica es el quinto mayor riesgo para la sociedad según la edición 2020 del informe Riesgos Globales del Foro Económico Mundial (World Forum Economic, 2020). El informe de Revisión Nacional Voluntaria de Ghana sobre la implementación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible revela que la disponibilidad de agua per cápita ha disminuido pero se mantiene por encima del umbral de estrés hídrico (1700 m^3 per cápita) (National Development Planning Commission, 2019). En lo que respecta a Venezuela, el Informe de Revisión Nacional Voluntaria, informó que uno de los impactos del cambio climático se ha sentido principalmente en la disponibilidad de agua para el rendimiento hidroeléctrico, que comprende entre el 60 y el 80 % del suministro nacional (Centro de Pensamiento Independiente, 2016).

Según Naciones Unidas, en su documento Agenda 2030, la escasez de agua afecta a más del 40 % de las personas, una cifra alarmante que se prevé que aumente a medida que lo hagan las temperaturas. Aunque 2100 millones de personas han mejorado el saneamiento del agua desde 1990, la disminución del suministro de agua potable está afectando a todos los continentes. Cada vez más países sufren estrés hídrico, y el aumento de la sequía y la desertificación ya están empeorando estas tendencias. Se prevé que para 2050 al menos una de cada cuatro personas sufrirá escasez recurrente de agua. El agua potable segura y asequible para todos para 2030 requiere que los países inviertan en infraestructura adecuada, proporcionen instalaciones sanitarias y fomenten la higiene, para lo cual la protección y restauración de los ecosistemas relacionados con el agua es esencial. El acceso al agua y al saneamiento para todos, que es el Objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contribuye al logro de la mayoría de los ODS.

En Venezuela, una de las zonas donde se han realizado recientes investigaciones de campo de aguas subterráneas es el municipio de San Diego, estado Carabobo. Este municipio tiene un límite político-territorial que coincide con la cuenca del río San Diego y también incluye el acuífero de San Diego (Huguet-Sierra y Márquez, 2021). Está limitado al Este, Norte y Sur por formaciones montañosas, y en el centro tiene características de valle aluvial, que es donde se ha asentado su desarrollo urbano. La cuenca del río San Diego se extiende hacia el municipio de Los Guayos hacia el sur, donde el mismo cauce se conoce como río Los Guayos, cuya descarga se produce en el lago Valencia (Huguet-Sierra y Márquez, 2021; Huguet-Sierra et al., 2023).

En el área del municipio de San Diego se estima una población urbana de aproximadamente 140000 habitantes en el año 2027 de acuerdo a la Alcaldía del Municipio de San Diego, mientras que el Instituto Nacional de Estadística reporta un crecimiento poblacional acelerado entre los censos consecutivos de 2001 y 2011 (Instituto Nacional de Estadística, 2014). Además, en la zona sur del municipio se concentra una zona de industrias y empresas comerciales. En total supone una demanda aproximada o consumo medio superior a los 400 L/s (Sánchez, 2013).

Para satisfacer la demanda de agua de la población del municipio de San Diego, el casco urbano del municipio se abastece con el subsistema del Sistema Regional Centro, con aportes de las grandes líneas de aducción de Valencia, estación de bombeo de Castillito, tuberías principales en el eje de la avenida Don Julio Centeno, y redes de distribución en cada urbanización y sector (Huguet-Sierra y Márquez, 2021; Huguet-Sierra et al., 2023). Adicionalmente, el norte del municipio de San Diego cuenta con la fuente superficial de La Cumaca, que abastece de agua a sectores cercanos, hasta parte del norte del municipio, con una producción promedio entre 20 y 30 L/s (Sánchez, 2013).

Además, el municipio cuenta con aproximadamente 58 pozos profundos activos (Márquez y Carrillo, 2015), la mayoría de los cuales son de uso doméstico. Este uso se refiere a que dichos pozos abastecen de agua directamente a las redes de distribución de los sectores aledaños, representando una proporción importante del aporte de agua potable. Este alto número de pozos profundos se debe principalmente a que se han tratado de compensar los problemas que presenta el Sistema Regional Central en San Diego, ya que no logra cubrir las demandas de flujo de todos los sectores, ni opera de manera continua, ya que de ese sistema se recibe agua de forma intermitente, dos o tres veces por semana durante unas 12 a 20 horas cada vez (Huguet-Sierra y Márquez, 2021; Huguet-Sierra et al., 2023). Esta situación tiende a acentuarse debido al alto crecimiento urbano y comercial del municipio (Sánchez, 2013).

Otro aspecto adicional al uso de las aguas subterráneas está relacionado con su calidad. En este contexto de uso para abastecimiento urbano, sus características físico-químicas deben permitir el consumo (doméstico, industrial o agrícola) sin necesidad de requerir sistemas de depuración que encarezcan los costes de producción (Huguet-Sierra y Márquez, 2021; Huguet-Sierra et al., 2023). Hay casos en los que una elevada extracción de agua subterránea modifica las condiciones del acuífero, sus niveles o su caudal original, produciendo la intrusión de agua de menor calidad, como en las proximidades del mar, o de lagos salobres como el lago de Valencia (Huguet-Sierra y Márquez, 2021; Huguet-Sierra et al., 2023).

Por lo tanto, como fuente importante de abastecimiento que es el acuífero de San Diego, se deben estudiar sus características, los factores que intervienen en el balance hídrico del ambiente geológico subterráneo y su calidad (Huguet-Sierra y Márquez, 2021; Huguet-Sierra et al., 2023). Estos son aspectos claves ya que es necesario realizar un manejo adecuado de este recurso, al utilizarlo como fuente de abastecimiento de las redes de acueductos para su población bajo esquemas de uso sustentable (Ley de Aguas, art. 10 y 11, (Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela, 2007)). De lo anterior, este estudio cubre cinco objetivos: (i) caracterización de los constituyentes hidrogeoquímicos del acuífero de San Diego en el periodo 2015-2018, (ii) determinación de los parámetros geofísicos e hidráulicos del acuífero del municipio de San Diego en el periodo 2015-2018, (iii) estimación de los parámetros del balance de aguas subterráneas del acuífero de San Diego en el período 2015-2018, (iv) análisis de la influencia de los constituyentes hidrogeoquímicos del acuífero de San Diego en el uso

sustentable de su agua, y (v) evaluación de los constituyentes hidrogeoquímicos del acuífero de San Diego en el período 2015-2018, en relación con su equilibrio e influencia en el uso sostenible del agua para abastecimiento urbano.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde al acuífero de San Diego, que comprende las cuencas de los ríos San Diego y Los Guayos, cuyas coordenadas corresponden a N $10^{\circ}22'00''$ a N $10^{\circ}09'00''$ y longitud Oeste $67^{\circ}52'00''$ a W $68^{\circ}00'00''$. El acuífero de San Diego está contenido en una subcuenca del lago Valencia (Figura 1).

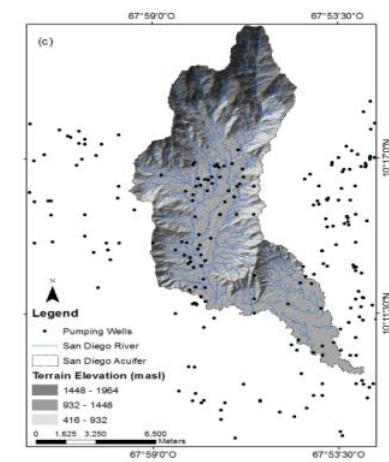


Figura 1: Área del acuífero de San Diego con ubicación de pozos profundos en el área.

Fuente: (Márquez, Guevara y Rey, 2018).

Fases de la investigación

Las fases de la investigación incluyen cinco procedimientos para dar respuesta a los objetivos específicos y generales del presente estudio: (i) caracterización de los constituyentes hidrogeoquímicos del acuífero de San Diego en el período 2015-2018, (ii) determinación de los componentes geofísicos e hidráulicos del acuífero del municipio de San Diego en el período 2015-2018, (iii) estimación de los parámetros del balance de aguas subterráneas del acuífero de San Diego en el período 2015-2018, (iv) análisis de la influencia de los constituyentes hidrogeoquímicos del acuífero de San Diego sobre el uso sustentable de su agua, y (v) evaluación de los constituyentes hidrogeoquímicos del acuífero de San Diego en el período 2015-2018, en relación con su equilibrio e influencia en el uso sustentable del agua para suministro urbano.

Caracterización de los constituyentes hidrogeoquímicos del acuífero de San Diego en el periodo 2015-2018

El muestreo desarrollado en este estudio fue del tipo probabilístico por conglomerados (Hernández-Sampieri et al., 2014), según el cual las unidades se encapsulan en determinadas ubicaciones físicas. El muestreo por conglomerados implica diferenciar entre la unidad de análisis y la unidad de muestreo. La unidad de análisis indica a quién se va a medir. La unidad de muestreo (en este tipo de muestra) se refiere al conglomerado a través del cual se logra el acceso a la unidad de análisis.

En este estudio, la unidad de análisis estuvo compuesta por los pozos de agua potable registrados por la empresa Hidrológica del Centro (Tabla 1), Ministerio de Ecosocialismo y Aguas (Tabla 2), y las tesis de pregrado atendidas por el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC) (Tabla 3), respectivamente. La unidad de muestra puede ser considerada como la administradora de los pozos, HIDROCENTRO, MINEA, así como urbanistas y empresas privadas.

Tabla 1: Componentes del muestreo por conglomerados de caudal y nivel de agua de pozos administrados por la empresa Hidrológica del Centro en el acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo.

Parámetros	Unidad de muestreo	Unidad de análisis				Ubicación
		No.	X	Y	Serial	
Flujo de bombeo	Compañía Hidrológica del Centro	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
		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	Josefina
		11	614146.35	1134443	103223	Brisas del Valle
		12	615931	1134443	103235	El Polvero
		13	613514	1135119	103096	Crispín (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

Fuente: Elaboración propia. Adaptado de Márquez y Carrillo (2015).

Tabla 2: Componentes del muestreo por conglomerados de caudales y niveles de agua de pozos administrados por el Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y Aguas (MPPEA) en el acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo.

Parámetros	Unidad de muestreo	Unidad de análisis				Ubicación	Propietario
		No.	X	Y	Serial		
Caudal de bombeo y nivel de agua	MPPEA	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	Asentamiento. 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	Pescante 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 Yudé
		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	Diógenes Chacín
		11	613.673,37	1.128.519,07	CA6260081A	carolina già	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 Martinez
		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 Carreño
		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	MARN
		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 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	Malariaología
		31	613.177,26	1.131.404,96	CA6260248A	Mañongo	Pedro Girón
		32	611.351,63	1.131.399,16	CA6260249A	Mañongo	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

Fuente: Elaboración propia. Adaptado de Márquez y Carrillo (2015).

Tabla 3: Componentes del muestreo por conglomerados para la medición de caudales y niveles de los pozos administrados por el Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y Aguas, empresa Hidrológica del Centro y urbanizaciones privadas en el acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo, obtenido de la tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC)

No.	X	Y	Identificación	Responsable	Referencia
1	613796	1130979	IAMDESANDI	ALCALDÍA DE SAN DIEGO	Márquez, Mercado y Rodríguez (2015)
2	613565.98	1129788.15	morro yo	HIDROCENTRO	Márquez, Mercado y Rodríguez (2015)
3	613992.28	1129902.97	MorroII	HIDROCENTRO	Márquez, Mercado y Rodríguez (2015)
4	613366.96	1130435.18	esmeralda	HIDROCENTRO	Márquez, Mercado y Rodríguez (2015)
5	612589.03	1130935.21	EsmeraldaII	HIDROCENTRO	Márquez, Mercado y Rodríguez (2015)
6	613059.61	1130594.9	EsmeraldaIII	HIDROCENTRO	Márquez, Mercado y Rodríguez (2015)
7	612706.09	1130457.08	Esmeralda IV	HIDROCENTRO	Márquez, Mercado y Rodríguez (2015)
8	613871	1130826	parque Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez, Mercado y Rodríguez (2015)
9	614670	1127508	ProAgro, California, EE.UU.	ProAgro, California, EE.UU.	Márquez, Daza y Terán (2015)
10	612917	1127364	CA Venezolana de Pigmento	CA Venezolana de Pigmento	Márquez, Daza y Terán (2015)
11	613387	1127321	CA Venezolana de Pigmento	CA Venezolana de Pigmento	Márquez, Daza y Terán (2015)
12	613718	1127924	CA Venezolana de Pigmento	CA Venezolana de Pigmento	Márquez, Daza y Terán (2015)
13	612572	1126793	Motel Excalibur	Motel Excalibur	Márquez, Daza y Terán (2015)
14	622124	1127239	Colgate Palmolive, California, EE.UU.	Colgate Palmolive, California, EE.UU.	Márquez, Daza y Terán (2015)
15	613948	1127879	Cigarrera Bigott, CA	Cigarrera Bigott, CA	Márquez, Daza y Terán (2015)
16	613949	1127897	Cigarrera Bigott, CA	Cigarrera Bigott, CA	Márquez, Daza y Terán (2015)
17	613760	1127977	Cigarrera Bigott, CA	Cigarrera Bigott, CA	Márquez, Daza y Terán (2015)
18	616373	1138135	Urb. País Rivera	Urb. País Rivera	Márquez, García y Mendoza (2015)
19	614342	1135517	Urb. Villas de San Rafael	Urb. Villas de San Rafael	Márquez, García y Mendoza (2015)
20	615817	1137789	La Cumaca	La Cumaca	Márquez, García y Mendoza (2015)
21	613796	1130979	IAMDESANDI	ALCALDÍA DE SAN DIEGO	Márquez, Jiménez y Cruz (2015)
22	612589.03	1130935.21	EsmeraldaII	HIDROCENTRO	Márquez, Jiménez y Cruz (2015)
23	613871	1130826	Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez, Jiménez y Cruz (2015)
24	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015)
25	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015)
26	614118	1135490	TULIPAN III	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015)
27	614058	1135318	TULIPAN IV	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015)
28	613919	1135999	TULIPAN V	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015)
29	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015))
30	616373	1138135	Urb. País Rivera	Urb. País Rivera	Márquez, García y Ramírez (2015)
31	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez, Farias y Vallejo (2016)
32	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez, Farias y Vallejo (2016)
33	614992	1133241	Urb. Las Aves	Urb. Las Aves	Márquez, Farias y Vallejo (2016)
34	613498	1134157	Urb. Monteserino	Urb. Monteserino	Márquez, Farias y Vallejo (2016)
35	615974.25	1137460.6	Urb. Villas San Diego Country	Urb. Villas de San Diego Country	Márquez, Palma y Vegas (2016)
36	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez, Palma y Vegas (2016)
37	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez, Palma y Vegas (2016))
38	613949	1127897	Cigarrera Bigott, CA	Cigarrera Bigott, CA	Márquez, Hernández y Vázquez (2016)
39	614670	1126502	Pozo 13. ProAgro	ProAgro, California, EE.UU.	Márquez, Hernández y Vázquez (2016)
40	613796	1130979	IAMDESANDI	ALCALDÍA DE SAN DIEGO	Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017)
41	613503	1134139	Urb. Los Colores, Bosqueserino	Urb. Los Colores	Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017)
42	614668	1126507	ProAgro, California, EE.UU.	ProAgro, California, EE.UU.	Márquez, Montilla y Quiñonez (2017)
43	613950	1127884	Cigarrera Bigott, CA	Cigarrera Bigott, CA	Márquez, Montilla y Quiñonez (2017)
44	614668	1126507	Protinal Proagro Planta	Protinal Proagro Planta Embutidos	Márquez, Delgado y Vera (2017)
45	615974.25	1137460.67	Villas de San Diego Country	Urb. Villas de San Diego Country	Márquez, Quintero y Romero (2017)
46	613949	1127897	Cigarrera Bigott, CA	Cigarrera Bigott, CA	Márquez, Quintero y Romero (2017)
47	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez, Quintero y Romero (2017)
48	613957	1130618	Parque Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez, Segura y Rodríguez (2017)
49	614197	1130251	Urb. Yuma	HIDROCENTRO	Márquez, Segura y Rodríguez (2017)
50	613448	1134925	Sector Las Casitas	HIDROCENTRO	Márquez, Segura y Rodríguez (2017))
51	613366.96	1130435.18	esmeralda	HIDROCENTRO	Márquez, Segura y Rodríguez (2017)
52	613503	1134139	Urb. Los Colores, Bosqueserino	Urb. Los Colores	Márquez, Cordero y Jiménez (2017)
53	613796	1130979	IAMDESANDI	Alcaldia San Diego	Márquez, Cordero y Jiménez (2017)

Continúa en la siguiente página

Viene de la página anterior

No	X	Y	Identificación	Responsable	Referencia
54	614197	1130251	Urb. Yuma	HIDROCENTRO	Márquez, Flores y Urdaneta (2018)
55	613566	1129798	El MorroI	HIDROCENTRO	Márquez, Flores y Urdaneta (2018)
56	612912	1131475.759	Colegio Clorinda Azcunes	Colegio Clorinda Azcunes	Márquez, Monsalve y Villareal (2018)
57	613957	1130618	Parque Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez, Monsalve y Villareal (2018)
58	613992	1129903	Urb. El Morro	HIDROCENTRO	Márquez, Martín y Álvarez (2018)
59	615367	1130435	Urb. La Esmeralda	HIDROCENTRO	Márquez, Martín y Álvarez (2018)
60	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2019)
61	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2019)
62	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez, García y Cárdenas (2017)
63	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez, García y Cárdenas (2017)
64	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2021)
65	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2021)

Fuente: Elaboración propia (2024).

Las Tablas 4 y 5 presentan los elementos del muestreo por conglomerados de los pozos del acuífero del Municipio de San Diego para las características fisicoquímicas y bacteriológicas medidas durante el periodo 2015-2019 en los pozos registrados por la Empresa Hidrológica Central, Ministerio de Ecosocialismo y Aguas y 21 tesis de pregrado asistido por el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC), respectivamente. En la Tabla 4 se muestra que los resultados de los parámetros fisicoquímicos realizados por el Ministerio de Ecosocialismo y Aguas fueron realizados durante el período 1970-1995 en pozos ubicados dentro de fundos, fincas y fincas de propiedad pública (por ejemplo, ACUERUR, IAN y MARN), por lo que como propiedad privada que constituyen el 70 % del registro en la Tabla 5.

En la Tabla 5 se presentan los estudios desarrollados a través de las tesis asesoradas por el CIHAM UC, en las que se reportan caracterizaciones de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos realizadas por laboratorios certificados por el Ministerio de Ecosocialismo y Aguas y por el Laboratorio de Aguas de Aragua adscrito al Ministerio de Ecosocialismo y Aguas. Las caracterizaciones incluyeron 42 muestreos realizados en áreas predominantemente residenciales, y en menor medida en áreas recreativas e industriales del acuífero del municipio de San Diego. Las tesis de pregrado involucradas cubren documentos aprobados en el período 2015-2021.

Tabla 4: Componentes del muestreo por conglomerados para el muestreo de parámetros fisicoquímicos de pozos registrados en el Ministerio de Ecosocialismo y Aguas del acuífero del municipio de San Diego, estado Carabobo, obtenidos de tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC).

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	Pescante 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 Yudé
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 Lozano
20	619,129	1.124.408	CA6260074A	110473	Gja Palmarito Los Robles V127	Óscar 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	carolina gja	Carolina De Covacs
25	613,669	1.128.506	CA6260081A	30473	carolina gja	Carolina De Covacs
26	613,699	1.128.506	CA6260081A	171077	carolina gja	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	reinamartinez
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 Carreño
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

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de Márquez y Carrillo (2015).

Tabla 5: Componentes del muestreo por conglomerados para muestreo de parámetros fisicoquímicos de pozos administrados por la empresa Hidrológica del Centro y urbanizaciones privadas en el acuífero del municipio de San Diego, estado Carabobo, obtenido de la tesis del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM UC).

No	X	Y	Identificación	Responsable	Referencia
1	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015)
2	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015))
3	614118	1135490	TULIPAN III	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015)
4	614058	1135318	TULIPAN IV	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015)
5	613919	1135999	TULIPAN V	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015)
6	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez, García y Ramírez (2015)
7	616373	1138135	Urb. País Rivera	Urb. País Rivera	Márquez, García y Ramírez (2015)
8	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez, Farías y Vallejo (2016)
9	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez, Farías y Vallejo (2016)
10	614992	1133241	Urb. Las Aves	Urb. Las Aves	Márquez, Farías y Vallejo (2016)
11	613498	1134157	Urb. Monteserino	Urb. Monteserino	Márquez, Farías y Vallejo (2016)
12	615974.25	1137460.67	Urb. Villas de San Diego Country	Villas de San Diego Country	Márquez, Palma y Vegas (2016)
13	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez, Palma y Vegas (2016)
14	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez, Palma y Vegas (2016)
15	613949	1127897	Cigarrera Bigott, CA	Cigarrera Bigott, CA	Márquez, Hernández y Vázquez (2016)
16	614670	1126502	Pozo 13. ProAgro	ProAgro, California, EE.UU.	Márquez, Hernández y Vázquez (2016)
17	613796	1130979	IAMDDESANDI	ALCALDÍA DE SAN DIEGO	Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017)
18	613503	1134139	Urb. Los Colores, Bosqueserino	Urb. Los Colores	Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017)
19	614668	1126507	ProAgro, California, EE.UU.	ProAgro, California, EE.UU.	Márquez, Montilla y Quiñonez (2017)
20	613950	1127884	Cigarrera Bigott, CA	Cigarrera Bigott, CA	Márquez, Montilla y Quiñonez (2017)
21	614668	1126507	Protinal Proagro	Protinal Proagro Planta Embutidos	Márquez, Delgado y Vera (2017)
22	615974.25	1137460.67	Villas de San Diego Country	Urb. Villas de San Diego Country	Márquez, Quintero y Romero (2017)
23	613949	1127897	Cigarrera Bigott, CA	Cigarrera Bigott, CA	Márquez, Quintero y Romero (2017)
24	613554	1134775	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez, Quintero y Romero (2017)
25	613957	1130618	Parque Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez, Segura y Rodríguez (2017)
26	614197	1130251	Urb. Yuma	HIDROCENTRO	Márquez, Segura y Rodríguez (2017)
27	613448	1134925	Sector Las Casitas	HIDROCENTRO	Márquez, Segura y Rodríguez (2017)
28	613366.96	1130435.18	esmeralda	HIDROCENTRO	Márquez, Segura y Rodríguez (2017)
29	613503	1134139	Urb. los colores,	Urb. Los Colores	Márquez, Cordero y Jiménez (2017)
30	613796	1130979	IAMDDESANDI	ALCALDÍA DE SAN DIEGO	Márquez, Cordero y Jiménez (2017)
31	614197	1130251	Urb. Yuma	HIDROCENTRO	Márquez, Flores y Urdaneta (2018)
32	613566	1129798	El MorroI	HIDROCENTRO	Márquez, Flores y Urdaneta (2018)
33	612912	1131475.759	Colegio Clorinda Azcunes	Colegio Clorinda Azcunes	Márquez, Monsalve y Villareal (2018)
34	613957	1130618	Parque Metropolitano	HIDROCENTRO	Márquez, Monsalve y Villareal (2018)
35	613992	1129903	Urb. El Morro	HIDROCENTRO	Márquez, Martín y Álvarez (2018)
36	615367	1130435	Urb. La Esmeralda	HIDROCENTRO	Márquez, Martín y Álvarez (2018)
37	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2019)
38	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2019)
39	613833	1135056	TULIPAN I	HIDROCENTRO	Márquez, García y Cárdenas (2017)
40	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2019)
41	613536.88	1134540.8	TULIPAN VI	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2021)
42	613730	1135169	TULIPAN II	HIDROCENTRO	Márquez et al. (2021)

Fuente: Elaboración Propia. Adaptado de Márquez y Carrillo (2015).

Procedimiento para medir niveles de agua en pozos subterráneos

La medición de la profundidad de la superficie del agua debajo de la superficie de referencia del terreno utilizando cinta aislante se realizó siguiendo el procedimiento establecido por el

Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) en (Cunningham y Schalk, 2014). En las tesis de pregrado del CIHAM-UC realizadas por Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021), se utilizó cinta aislante, de doble hilo y graduada en metros, décimas y centésimas de metros, modelo PLM, marca Seba Hydrometrie proporcionada por CIHAM-UC. La cinta aislante se instaló en un carrete accionado por manivela que contiene espacio para las baterías y algún dispositivo (“Indicador”) para señalar cuando el circuito está cerrado.

Procedimiento para la determinación de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos del agua bombeada de los pozos subterráneos

La determinación de las características fisicoquímicas y bacteriológicas fueron realizadas por laboratorios certificados por el Ministerio de Ecosocialismo y Aguas en los informes obtenidos de urbanismo y empresas privadas con actividad dentro del municipio de San Diego y también se describe en Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021). Así mismo, se realizaron determinaciones de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del municipio de San Diego, referenciados en 42 estudios consistentes en tesis de pregrado dirigidas por el CIHAM-UC (Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021)), los cuales se enumeraron en la Tabla 6. Las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos Los parámetros se realizaron en el Laboratorio Ambiental Aragua, dependiente de la Dirección Estatal de Ecosocialismo y Aguas. Según el Laboratorio Ambiental Aragua,

dependiente de la Dirección Estatal de Ecosocialismo y Aguas, las muestras fueron analizadas de acuerdo a lo establecido en los Métodos Estándar Para el Examen de Aguas y Aguas Residuales, (Rice et al., 2012), y la Norma Internacional ISO/IEC 17025 (International organization for standardization, 2017), según el cual al menos el 10 % de las muestras se analizan por duplicado. En cada corrida analítica se utilizan materiales de referencia o estándares certificados con trazabilidad, los cuales de acuerdo al Procedimiento de Verificación de Pruebas MP-06-0, deben presentar un error menor al 10 % para garantizar la exactitud y precisión de las pruebas. En las Tablas 6 y 7 se vinculan los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos con los métodos de los Métodos Estándar para el Examen de Aguas y Aguas Residuales, (Rice et al., 2012), que fueron aplicados para las determinaciones en el agua captada de los pozos del acuífero del municipio de San Diego, Estado Carabobo.

Tabla 6: Método para la determinación de los parámetros fisicoquímicos en el agua de los pozos acuíferos del municipio San Diego, estado Carabobo, según el Laboratorio Ambiental Aragua.

Parámetros	Unidad	Método
Conductividad eléctrica	$\mu S/cm$	SM 2510-B
pH	Adim	SM 4500-H ⁺ B
Temperatura	°C	SM 2550 B
Color verdadero	Unid. pt. Co	SM 2120 B
Turbiedad	UNT	SM 2130 B
Dureza total	mg/L $CaCO_3$	SM 2340-C
Dureza del calcio	mg/L $CaCO_3$	SM 3500-D
Dureza del magnesio	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

Fuente: Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez, Guevara y Rey (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

Tabla 7: Método para la determinación de los parámetros bacteriológicos en el agua de los pozos acuíferos del municipio San Diego, estado Carabobo, según el Laboratorio Ambiental Aragua.

Parámetros	Unidad	Método
Cloro residual	mg/L	SM 4500 Cl -G
Heterótrofos	UFC/mL	SM 9215 A y B
Coliformes totales	NMP/100 ml	SM 9221 B
Coliformes fecales	NMP/100 ml	SM 9221 E

Fuente: Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez, Guevara y Rey (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

Determinación de los parámetros geofísicos e hidráulicos del acuífero del municipio de San Diego en el periodo 2015-2018

El acuífero del Municipio de San Diego tiene características que lo identifican como de tipo confinado, ya que presenta estratos impermeables (arcillas, arenas finas) en las capas superior, intercalada e inferior, como así se puede verificar en los 28 perfiles litológicos de los pozos registrados antes del Ministerio de Ecosocialismo y Aguas, y ubicado dentro del acuífero. Según (Bear y Cheng, 2010), en un acuífero confinado la presión del agua en él es tal que el nivel del agua en un pozo abierto estará en o aumentará por encima de la superficie límite superior impermeable. La superficie piezométrica de un acuífero confinado se encuentra por encima del techo impermeable de este último. En un acuífero confinado el agua está bajo presión, del mismo modo que en una tubería. Por lo tanto, en el caso de perforar un pozo en este estrato, el agua asciende a través del pozo por encima del nivel de confinamiento (Guevara y Cartaya, 2004). Bajo la condición de confinamiento, el procedimiento aplicado en este estudio para determinar los parámetros geofísicos e hidráulicos implica considerar la condición de flujo no permanente hacia un pozo en un acuífero confinado (Guevara y Cartaya, 2004). La solución para un flujo no permanente en un pozo confinado fue deducida por (Theis, 1935).

Determinación de parámetros hidráulicos por método gráfico

Las propiedades T y S del acuífero se pueden determinar bombeando un caudal variable Q y midiendo la reducción durante varios intervalos de tiempo. Las propiedades del acuífero no se pueden establecer directamente, pero existen técnicas gráficas para su determinación indirecta, siguiendo el método de Theis explicado en Guevara y Cartaya (2004).

Métodos de prueba de bombeo

Las pruebas de bombeo de pozos son necesarias para determinar la capacidad del pozo, la reducción, la capacidad de producción a largo plazo y los parámetros para el tamaño permanente de la bomba y para recolectar muestras de agua para su análisis. Según ANSI/AWWA A100-97 (American Water Works Association, 1998) y NTC 5539 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2007), para la prueba de bombeo se debe utilizar una bomba de prueba y mecanismos para medir el nivel y flujo del agua.

Pruebas de abatimiento escalonadas

Se deben realizar pruebas de abatimiento por pasos para determinar los parámetros generales de las pruebas de bombeo de flujo constante ANSI/AWWA A100-97 (American Water Works Association, 1998) y NTC 5539 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2007). Estos parámetros son el coeficiente de transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S). El pozo debe bombarse a caudales progresivamente más altos, y la duración de cada liberación por paso debe ser lo suficientemente larga como para mostrar la indicación de una tendencia a una línea recta al trazar la reducción versus el registro de tiempo desde que comenzó el bombeo.

Mediciones de nivel de agua

Se deben tomar mediciones del nivel de agua antes, durante y después de la prueba de bombeo para obtener información de referencia (niveles de agua estáticos), los efectos del bombeo (niveles de agua durante el bombeo) y un perfil de recuperación del agua. La frecuencia de medición de los niveles de agua durante la prueba de bombeo debe ser tal que esté disponible una definición adecuada de los datos del tiempo de abatimiento.

Determinación de los parámetros del balance de aguas subterráneas del acuífero de San Diego en el periodo 2015-2018

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

Recopilación de información

La base de datos utilizada en esta actividad ha sido adquirida de tres fuentes de información, las cuales son (Márquez, Cordero y Jiménez, 2017; Márquez, Segura y Rodríguez, 2017): a) Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología perteneciente al Ministerio de Relaciones Interiores, Justicia y Paz (descargado del sitio web: <http://www.inameh.gob.ve/web/>, b) Compañía Central Hidrológica a través del suministro de caudales en el periodo 2015-2018, c) Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM -UC) a través de los estudios desarrollados por Márquez y Carrillo (2015), Márquez, Mercado y

Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

Procesamiento de información

i) *Predicción espacial de las variables hidrometeorológicas*

Se aplican modelos estadísticos de predicción espacial para estimar 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 objetiva 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, las salidas y el procedimiento computacional para derivar salidas basadas en las entradas dadas por la expresión 1 (Hengl, 2007):

$$\hat{z}(s_0) = E\left(\frac{Z}{z}(s_i), q_k(s_0), \gamma(h), s \in A\right) \quad (1)$$

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 Krigging Ordinario (OK); cuya técnica fue desarrollada por Kirsch (2006). Las predicciones se basan en la ecuación 2.

$$s = \mu + \varepsilon'(s) \quad (2)$$

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 Matheron (1963) introdujo el análisis de los datos puntuales, la derivación y el seguimiento de las llamadas semivarianzas, diferencias entre los valores vecinos.

ii) Predicción espacial de la infiltración

La estimación de la precipitación efectiva en la cuenca acuífera del Municipio de San Diego se realizó aplicando el método del Servicio de Conservación de Estados Unidos (US-SCS) (Guevara y Cartaya, 2004). El método US-SCS comúnmente conocido como método del número de curva (CN), cuyo objetivo es calcular las extracciones de agua de una tormenta. En este método, el exceso de precipitación (profundidad de escorrentía superficial) es función de la precipitación total en la cuenca, un parámetro de abstracción y el número de curva de escorrentía (CN).

iii) Balance hídrico

Las cantidades de agua involucradas en uno o más de los procesos del ciclo hidrológico generalmente pueden evaluarse mediante la siguiente ecuación diferencial (Guevara y Cartaya, 2004):

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (3)$$

Donde:

I = contribución o afluente por unidad de tiempo

O = descarga o efluente por unidad de tiempo

$\frac{dS}{dt}$ = cambio en el almacenamiento por unidad de tiempo

La ecuación 3 se puede utilizar como modelo general del equilibrio hidrológico de la Tierra, describiendo el equilibrio hidrológico debajo de la superficie del suelo, como se expresa en la ecuación 4:

$$I - ET - Q_b = \Delta S \quad (4)$$

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

Análisis de la influencia de los constituyentes hidrogeoquímicos del acuífero de San Diego en el uso sustentable de su agua

Los valores actuales de parámetros se comparan con las “Normas Sanitarias para la Calidad del Agua Potable” (Gaceta Oficial N° 36395, 1998), y con las “Normas para la clasificación y control de la calidad de las aguas de la cuenca del lago de Valencia” (decreto 3.219 de 1999).

Resultados y discusión

Caracterización de constituyentes hidrogeoquímicos del acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo en el periodo 2015 al 2018

Caracterización del caudal de bombeo en el acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo, Venezuela

La Figura 2 muestra la variación de los caudales de bombeo de 54 pozos del municipio de San Diego en el periodo 2015-2018, donde se observa una disminución promedio de 12 L/s a 6 L/s para el año 2015, al compararlo con el resto de los años. La distribución espacial de los flujos de bombeo en el acuífero del municipio de San Diego se muestra en la Figura 3, donde se observa que el flujo extraído varía predominantemente en un rango de hasta 6 L/s en las zonas residenciales y aumenta desde la zona norte hacia la zona sur del acuífero donde se ubican negocios e industrias (Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021)).

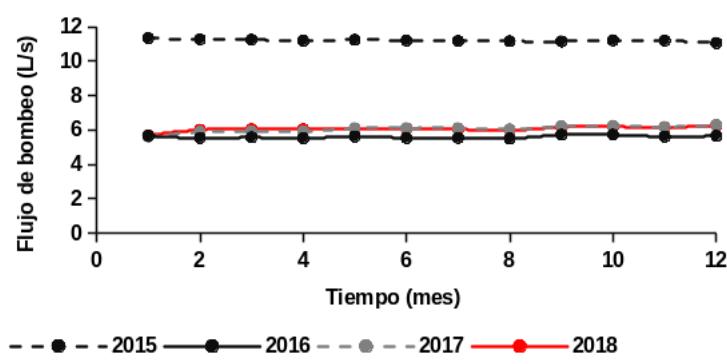


Figura 2: Variación de los caudales de bombeo en los pozos del municipio de San Diego, estado Carabobo en el periodo 2015-2018.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

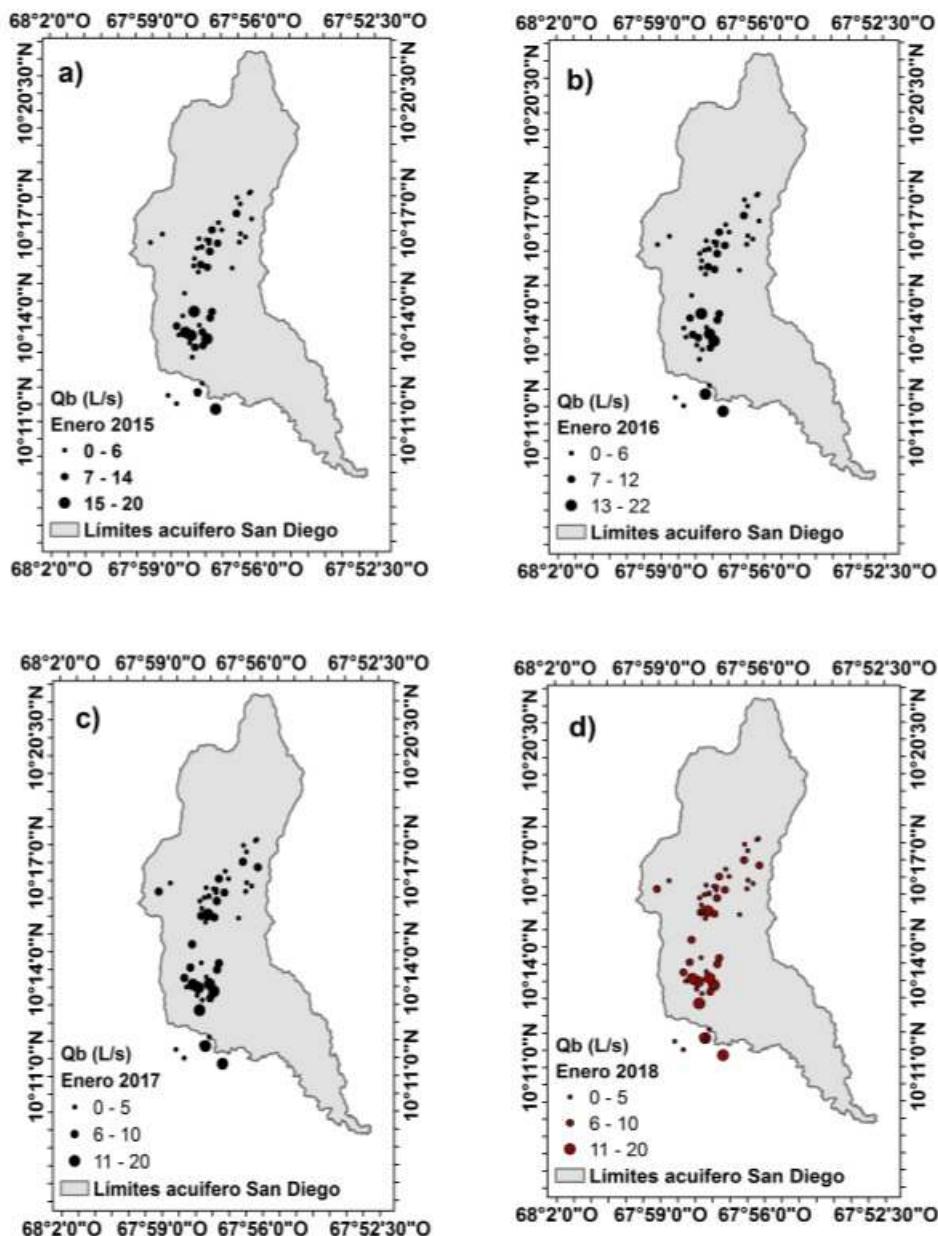


Figura 3: Distribución espacial de caudales de bombeo en los pozos del municipio de San Diego, estado Carabobo en el periodo 2015-2018.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Fariñas y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

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

La Figura 4 muestra los resultados de la caracterización de los niveles de agua en el acuífero del municipio de San Diego en el periodo 2015-2018 derivados de los estudios realizados por Márquez y Carrillo (2015), Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021), donde se observa que los niveles de agua disminuyen desde las zonas montañosas del acuífero hacia la llanura acuífera, siendo menores en el límite entre la zona norte y la zona central del municipio de San Diego donde se registra un intervalo entre 385 - 435 metros sobre el nivel del mar, lo que implica hasta 50 m de desnivel relativo respecto a la superficie del suelo. Asimismo, se observa que los niveles disminuyen en la dirección del gradiente hidráulico del acuífero hacia el lago Valencia, como vertiente principal del acuífero del municipio de San Diego ubicado hacia el sur.

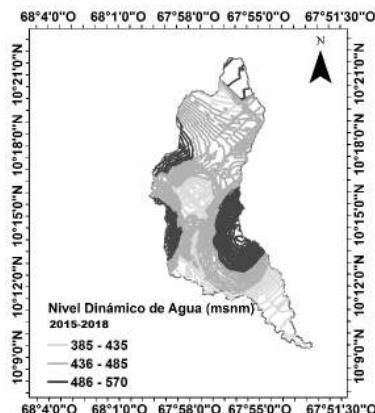


Figura 4: Distribución de niveles dinámicos de agua en los pozos del municipio de San Diego, estado Carabobo en el periodo 2015-2018.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

Caracterización de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el acuífero del municipio de San Diego, estado Carabobo

Las Figuras 5 y 6 muestran 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 acuíferos del municipio San Diego, Estado Carabobo durante el periodo 1970-2021, donde se puede observar que el ion bicarbonato presenta concentraciones similares del orden del 20-25 % para el rango entre 0 y 400 mg/L. El bicarbonato es el parámetro que de todos los mostrados en la figura 5 se detectó en un intervalo amplio en comparación con el resto de los aniones, los cuales mostraron la mayor frecuencia de ocurrencia para concentraciones en el primer intervalo de división de concentración de estos parámetros en las muestras analizadas.

En la Figura 6a se muestra que el bicarbonato resultó en los valores de intervalo más altos en pozos ubicados cerca de la transición entre la zona montañosa y la llanura donde los procesos de disolución de la roca podrían verse influenciados por el cambio abrupto del gradiente hidráulico debido a un cambio de régimen de flujo desde supercrítico, caracterizado por alta velocidad y baja presión, a crítico o subcrítico, caracterizado por baja velocidad y alta presión Potter et al. (2012), dentro de los estratos donde el acuífero que integran la formación geológica como se puede obtener en los perfiles litológicos.

La composición de las aguas de los pozos del acuífero del municipio de San Diego influenciada significativamente por la presencia de iones bicarbonato, sugiere que el acuífero del municipio de San Diego es del tipo Karstico (Kirsch, 2006), formado por la disolución de rocas carbonatadas (piedras caliza, dolomita). Las cuevas y canales kársticos se encuentran principalmente a lo largo de fracturas tectónicas o límites de capas horizontales. Los fenómenos kársticos no sólo ocurren en la superficie sino también a mayores profundidades en los acuíferos Merkel y Planer-Friedrich (2005). La razón es que la disolución del carbonato es un proceso comparativamente rápido, pero todavía lleva algo de tiempo, mientras que el agua puede cubrir una distancia bastante larga a lo largo de una fractura. Según Galán y Herrera (2017), las regiones de Venezuela que presentan acuíferos kársticos comprenden cerca del 20 % del territorio. Los karsts más significativos en el norte de Venezuela se distribuyen por los estados: (1) Zulia (2) Falcón (3) Miranda (4) Monagas (5) Afloramientos menores dispersos en Los Andes (estados Táchira, Mérida, Trujillo y Lara), Anzoátegui (Guanta, Turimiquire, Bergantín) y Sucre (cabeceras del Neverí, Cumanacoa), más algunos karsts costeros e insulares. (6) En el Sur del País los karsts en cuarcita se presentan en numerosos tepuys, principalmente en la cuenca del Caroní, meseta de Sarisariñama (en el alto Caura) y tepuy Autana.

Según Urbani (2005), se deduce que el municipio San Diego, estado Carabobo, está contenido en dos regiones geológicas, la región norte dentro de la Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa y la región sur dentro de la depresión del Lago de Valencia. Según Aguerrevere y Zuloaga (2003), el Lago de Valencia presenta varias fajas tectónicas

en parte yuxtapuestas, formando napas de tipo alpino. De acuerdo con Urbani (2005), así como Aguerrevere y Zuloaga (2003) han encontrado correlaciones entre las litologías de la Serranía del Litoral y la Serranía del Interior. El acuífero de San Diego podría estar contenido dentro de tres franjas establecidas por la correlación mencionada (Urbani, 2005): a) la asociación meta-sedimentaria Caracas (Jurásico-Cretásico) de conglomerados calcáreos o fase conglomerática de caliza, b) esquistos de Las Brisas, donde el 92 % del área de la unidad se forma de un esquisto cuarzo-albito-muscovítico-clorítico y en forma minoritaria se han encontrado esquisto calcáreo-grafítoso en la zona de Valencia-Mariara (Urbani, Contreras y Barrios, 1989), y c) esquistos de Las Mercedes, específicamente para la zona Valencia-Mariara (Urbani, Contreras y Barrios, 1989), se ha encontrado mayoritariamente formada de esquisto calcítico - grafítoso y mármol, con una asociación mineralógica de cuarzo, calcita, muscovita, albita, grafito, clorita y epidoto. En esta franja también se ha encontrado derivado de un estudio mineralógico de los mármoles de esta unidad (Urbani, Contreras, Barrios et al., 1989), que la dolomita se encuentra en baja concentración predominando los mármoles calcíticos.

La solubilidad de la calcita $CaCO_3$ depende de la temperatura y la presión parcial ejercida por el dióxido de carbono en la matriz porosa del acuífero (Merkel y Planer-Friedrich, 2005). En cuanto a la temperatura, la solubilidad óptima de la calcita se produce a $30^{\circ}C$, no a la temperatura máxima de $40^{\circ}C$. En primer lugar, como en el caso de la solubilidad del yeso, la formación del complejo $CaCO_3^0$ es endotérmica $H(CaCO_3^0) = +3,5$, mientras que la solución mineral es exotérmica $H(CaCO_3(s)) = -2,3$. Por tanto, la solubilidad máxima se produce a temperatura media, en la que la formación del complejo $CaCO_3^0$ ya ha aumentado y la solubilidad decreciente del $CaCO_3(s)$ no aún no predomina.

En la Figura 6 se muestra que las mayores concentraciones de iones como cloruro (Figura 6b), sulfato (Figura 6c) y nitrato (Figura 6e) se presentan en las muestras recolectadas en el lago Valencia, como uno de los principales cuerpos de agua del estado Carabobo, al que se enfrenta una diversidad de problemas interrelacionados que afectan las condiciones ambientales y amenazan la calidad de vida de sus habitantes (Guevara y Cartaya, 2004). La problemática del lago de Valencia se ha visto influida en gran medida por sus características geográficas que la distinguen, como es una cuenca cerrada (endorreica), así como por el acelerado crecimiento poblacional de los últimos 20 años y el desarrollo industrial (principal centro industrial del país).

Las Figuras 7 y 8 muestran la frecuencia relativa de ocurrencia y la distribución espacial de las concentraciones de cationes en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos acuíferos del municipio San Diego, estado Carabobo durante el periodo 1970-2019. donde se observa que el ion calcio se distribuye en un intervalo que varía entre 0 y 20 mg/L con la mayor frecuencia relativa de aparición (80 %), mientras que para concentraciones entre 20 y 120 mg/L se encontró con una frecuencia relativa entre 10 y 20 %. El resto de los cationes como magnesio, potasio, sodio + potasio se encontraron con mayor frecuencia de aparición (50 % y 80 %) en el menor intervalo entre los valores

mínimo y máximo ocurridos. En el caso específico de sodio + potasio, las concentraciones variaron entre 0 y 20 mg/L para una frecuencia alta (60 %), llegando hasta 100 mg/L con una frecuencia de aparición menor al 10 %. Este resultado, junto con el encontrado en el análisis de cationes, lleva a que el mayor número de pozos tengan en su composición agua con bicarbonato de calcio con presencia en menor proporción de bicarbonato de sodio, el cual se encontró presente en el agua de pozo ubicado en la zona agrícola del lago de Valencia (Figura 8).

Según Guevara y Cartaya (2004), el contenido de sales en las aguas de riego es un factor que debe manejarse correctamente para evitar la salinización y la improductividad de los suelos agrícolas. Las aguas bajas en sodio se pueden utilizar para riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Las aguas con un contenido muy elevado de sodio no son aptas para el riego, salvo cuando su salinidad sea baja o media y cuando la disolución del calcio en el suelo y la aplicación de yeso u otras mejoras no hagan antieconómico el uso de este tipo de aguas.

En cuanto a las propiedades y su mayor frecuencia de aparición se refiere a la alcalinidad (100 mg/L), dureza cárlica ($< 50\text{mg/L}$) y dureza total ($< 100\text{mg/L}$) son un indicador de la presencia predominante de iones de bicarbonato y carbonato, en el sentido de que dan capacidad de consumo de ácido al producir una solución tampón (Merkel y Planer-Friedrich, 2005). En general, los intervalos de ocurrencia de propiedades como pH, turbidez y sólidos disueltos son correspondientes a un tipo de agua potable (Normas Sanitarias para la Calidad del Agua Potable. Gaceta Oficial N° 36395, febrero de 1998).

La tendencia general es que los valores de los parámetros fisicoquímicos dentro del acuífero de San Diego se presenten en el intervalo más bajo hasta la frecuencia más alta en la mayor área del acuífero (norte, centro y sur) (Figuras 5, 7, 9 y 10) y aumentan en los intervalos promedio y máximo en la zona industrial y cerca del lago de Valencia, respectivamente. En cuanto a los parámetros bacteriológicos, como coliformes fecales, se encontraron valores inferiores a 1 NMP/100 mL con una frecuencia de ocurrencia del 60 %, ocurriendo principalmente en la zona residencial de los sectores norte a sur (Figura 10). Respecto a los coliformes totales fueron menores a 12 NMP/100 mL con una frecuencia de ocurrencia del 25 %.

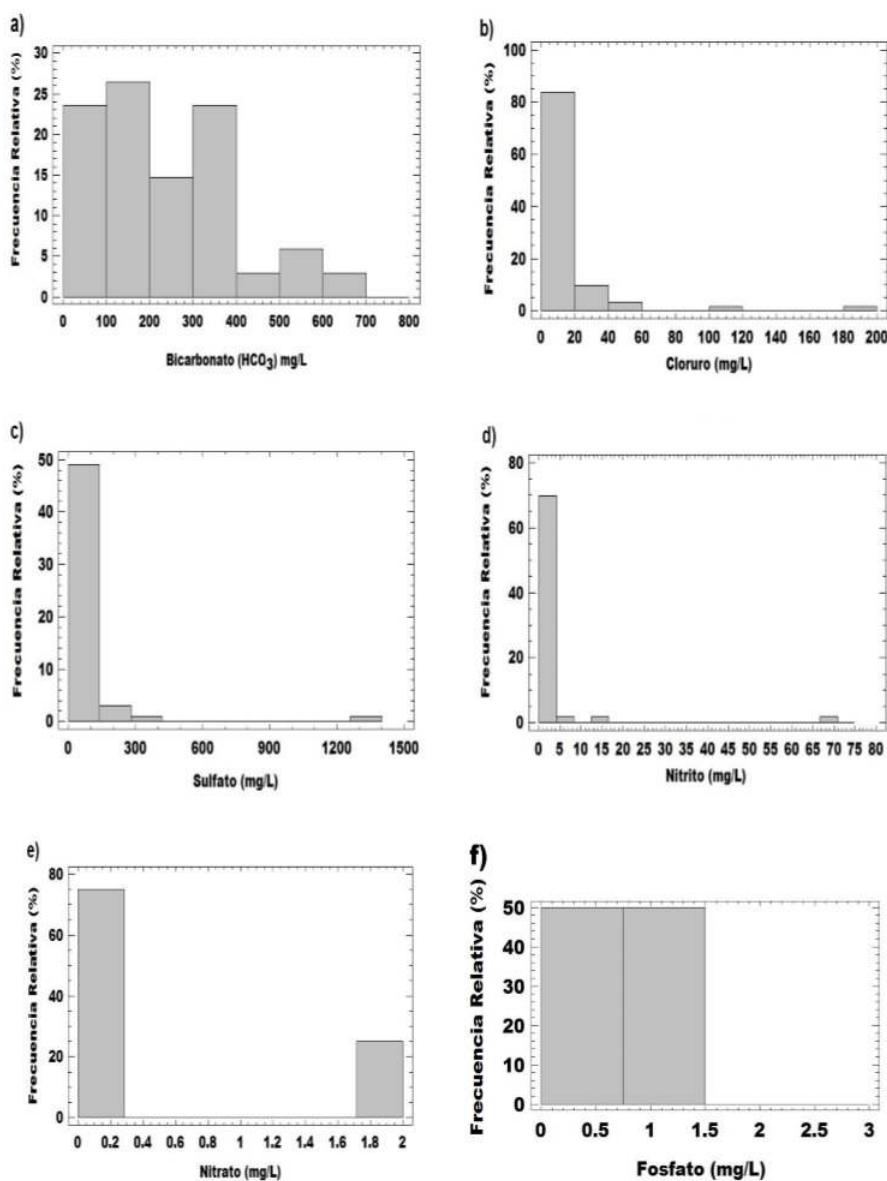


Figura 5: Frecuencia de ocurrencia de concentraciones de aniones en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos acuíferos del municipio San Diego, estado Carabobo durante el periodo 1970-2021.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

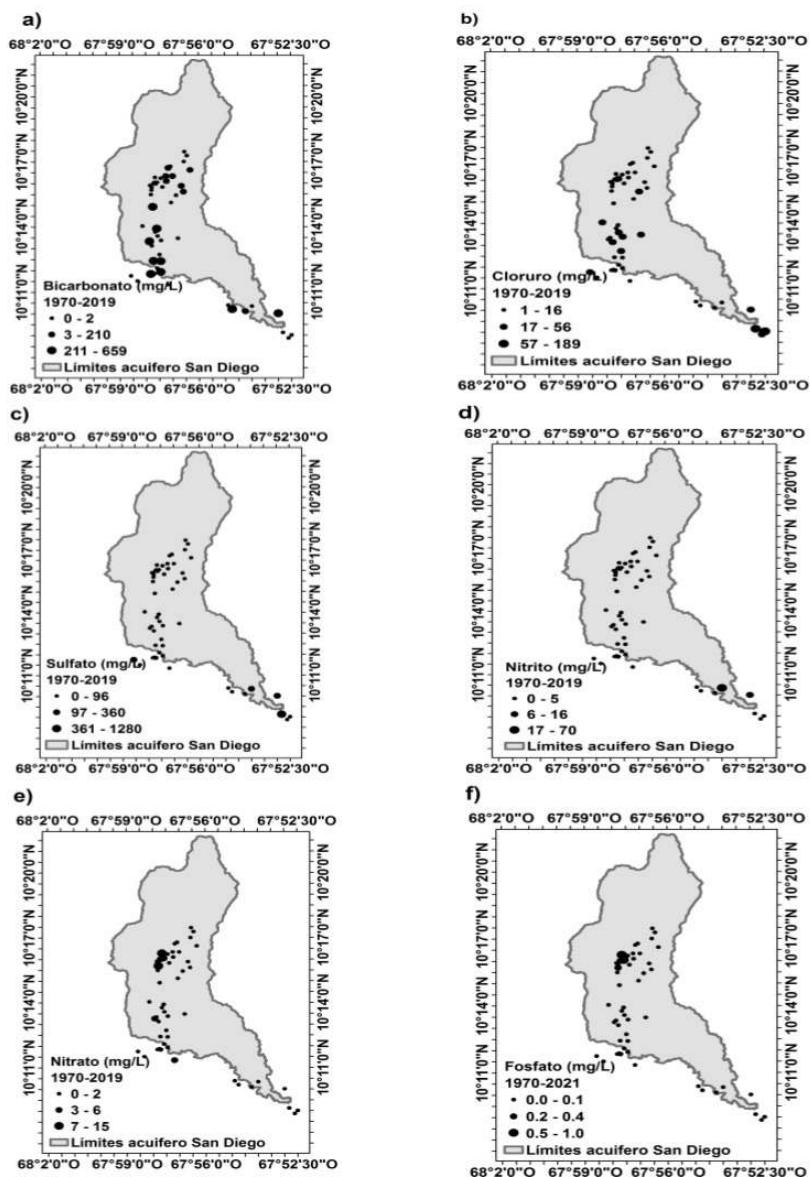


Figura 6: Distribución espacial de las concentraciones de aniones en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos acuíferos del municipio San Diego, estado Carabobo durante el periodo 1970-2021.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Fariás y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

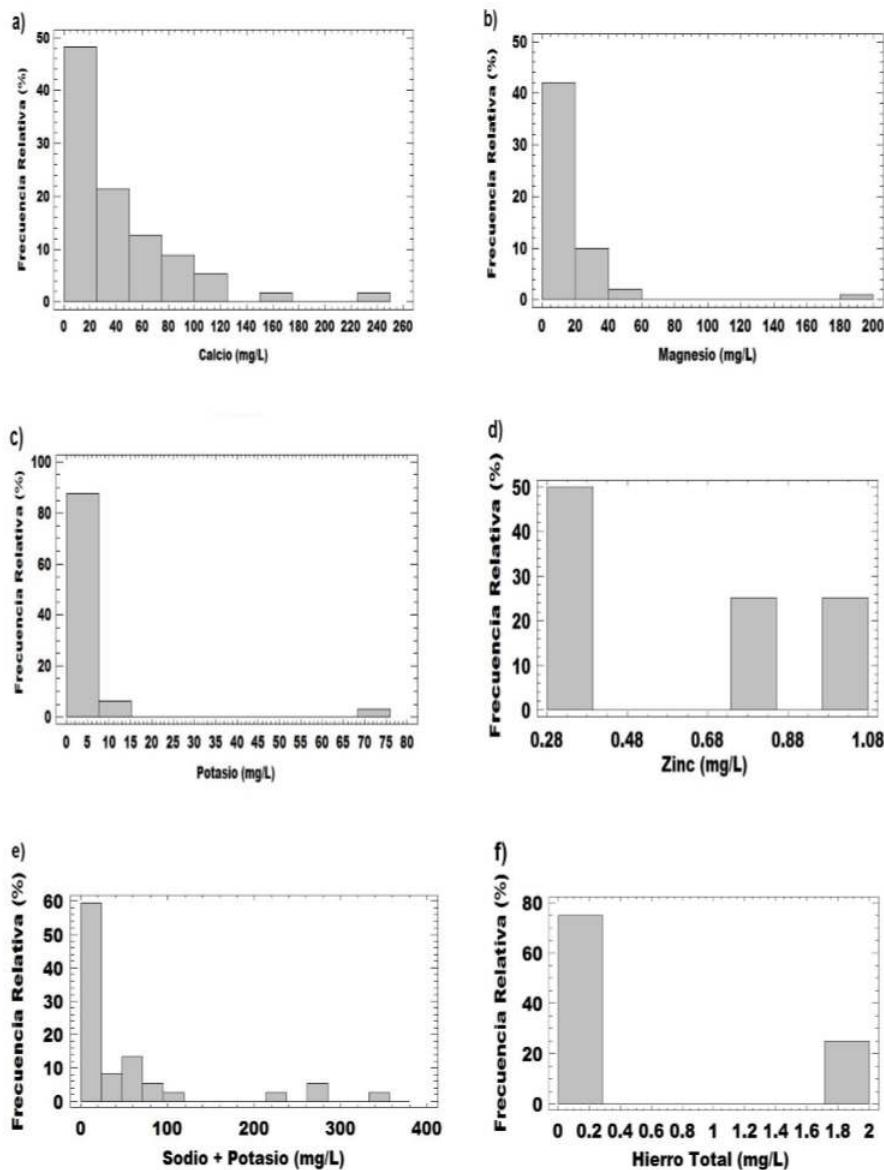


Figura 7: Frecuencia de ocurrencia de concentraciones de cationes en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos acuíferos del municipio San Diego, estado Carabobo durante el periodo 1970-2021.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

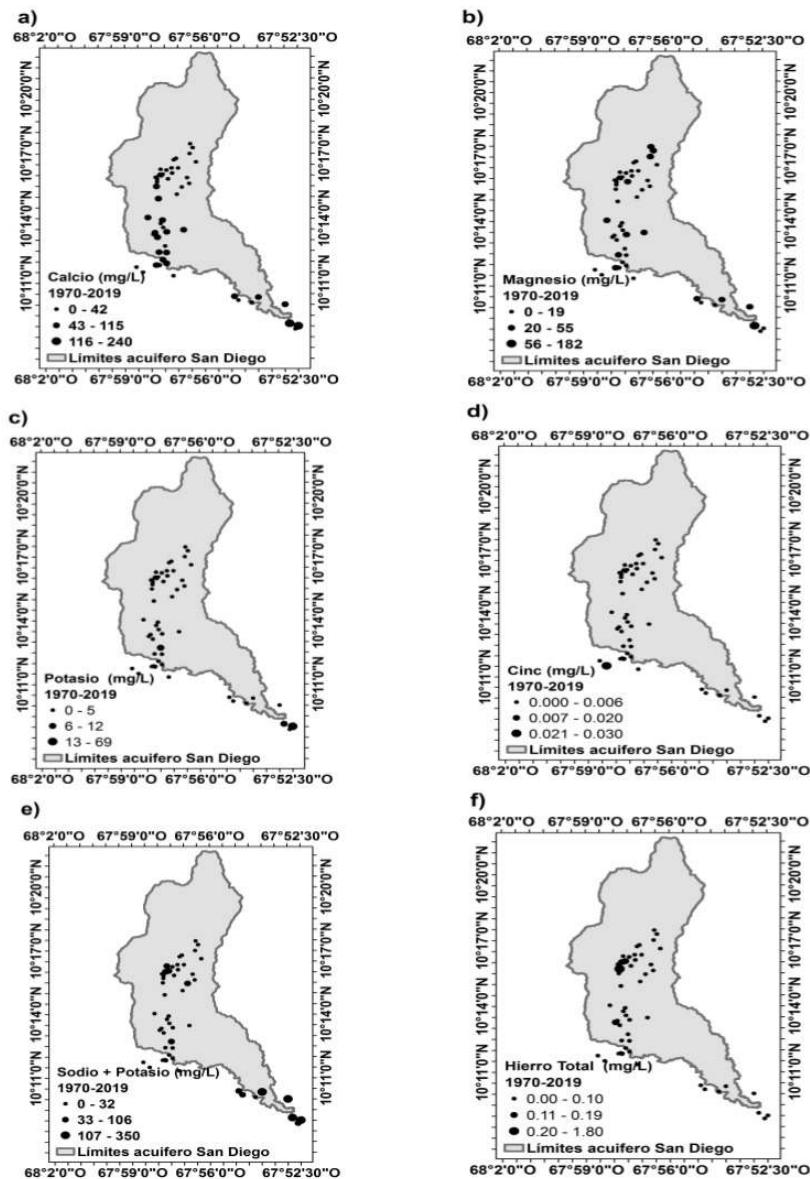


Figura 8: Distribución espacial de las concentraciones de cationes en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos acuíferos del municipio San Diego, estado Carabobo durante el periodo 1970-2019.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Fariás y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

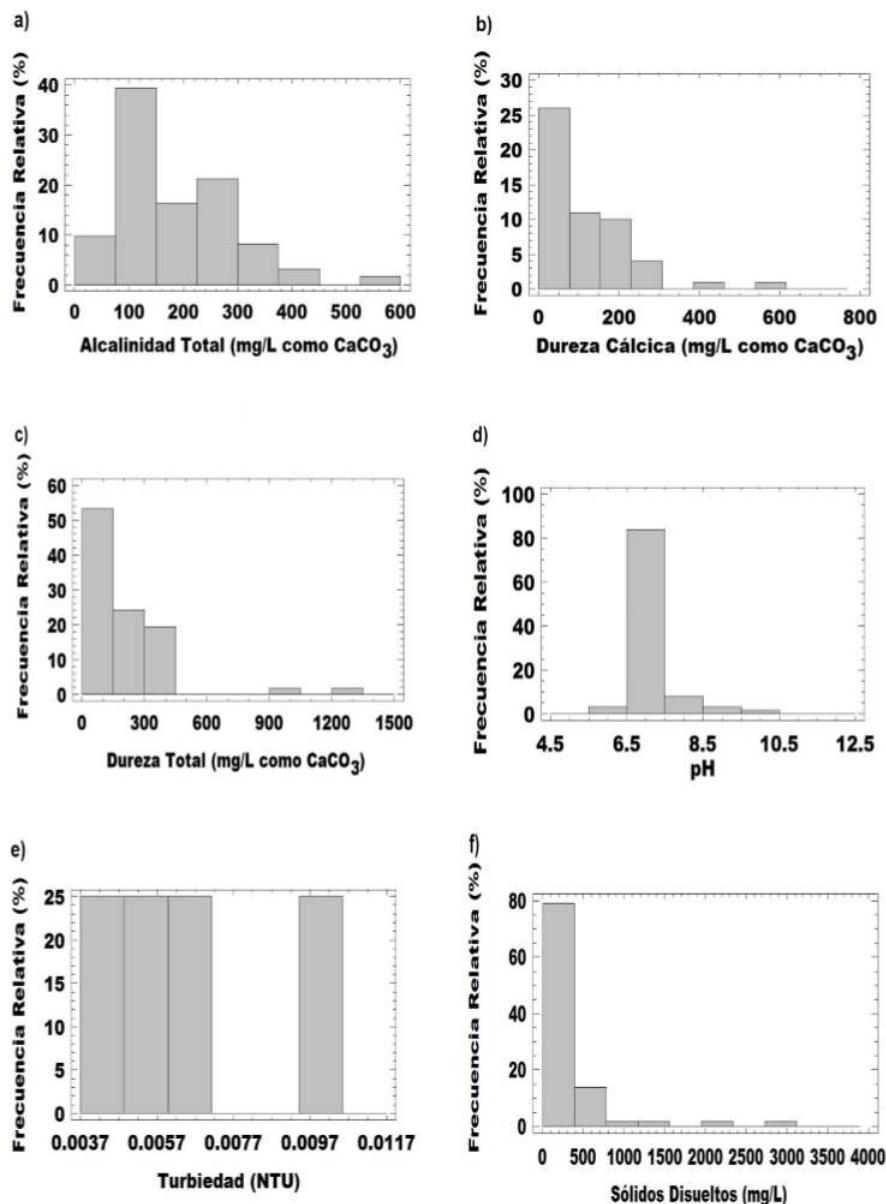


Figura 9: Frecuencia de ocurrencia de las concentraciones de las propiedades en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos acuíferos del municipio de San Diego, estado Carabobo durante el periodo 1970-2021.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

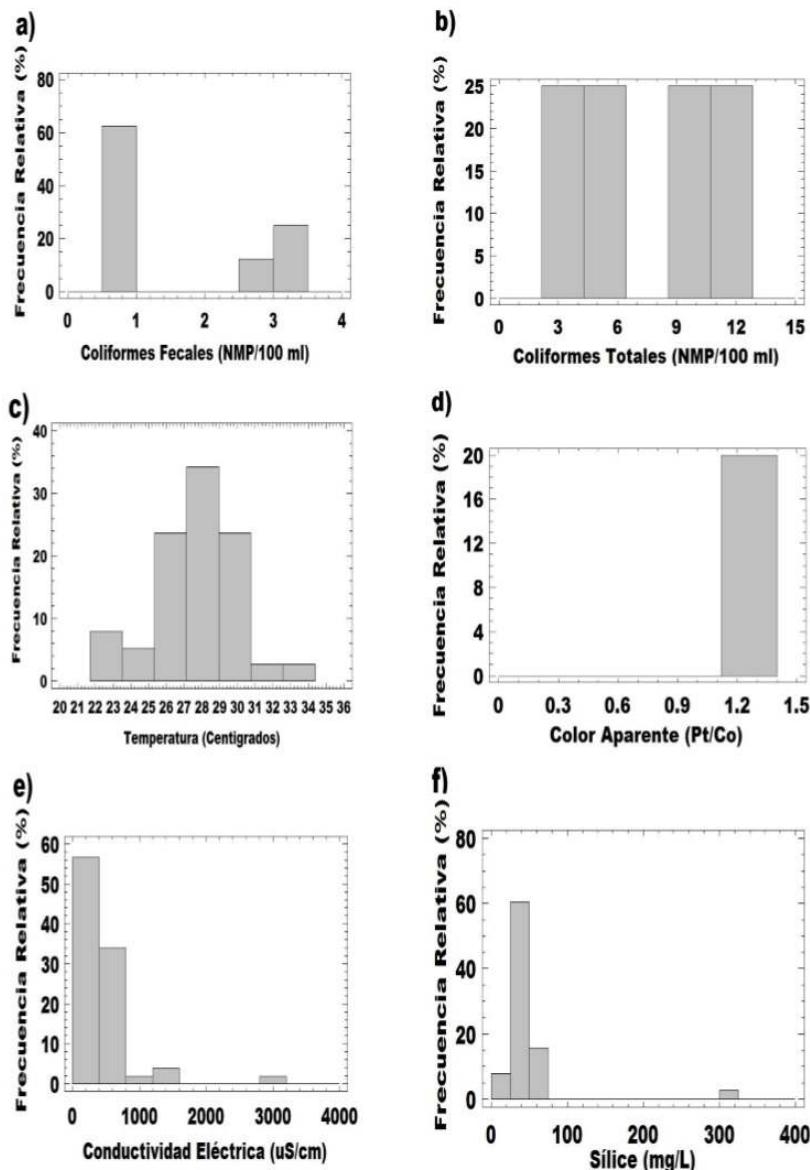


Figura 10: Frecuencia de ocurrencia de las concentraciones de las propiedades en los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en el agua de los pozos del acuífero del municipio de San Diego, estado Carabobo durante el periodo 1970-2021.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Fariás y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

La presencia de sustancias químicas en el agua del acuífero y su calidad son consecuencia de la composición de los estratos que entran en 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 recibir compuestos minerales y al mismo tiempo pierde 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 No. 3219, sobre Normas para la clasificación y control de la calidad de las aguas de la cuenca del lago de Valencia, y en aquellos casos de parámetros no contemplados en dicho decreto, se comparan con los valores dados en las Normas de Calidad del Agua Potable (Gaceta Oficial 36395), ver Tabla 8.

Tabla 8: Parámetros físico-químicos del agua del acuífero y comparación con los estándares de calidad del agua.

Parámetros	Valores medidos (rango)	Límites
Dureza total (mg/L)	52 - 618	500 (*)
Cloruros (mg/L)	5 - 80	600 (*)
Sulfato (mg/L)	40 - 461	400 (*)
Nitrato (mg/L)	0,1 - 18	10 (**)
Sólidos disueltos (mg/L)	87 - 1.384	1.500 (*)
Conductividad eléctrica ($\mu S/cm$)	188 - 2.340	-
pH	6 - 8	6,5 - 8,5 (**)
Coliformes totales (NMP/100 ml)	1,8 - 8	2.000 (*)

(*) Valores del Decreto 3219; (**) Valores de Gaceta 33395.

Fuente: Márquez, Guevara y Rey (2018).

Dureza. Dureza total. En primer lugar, los análisis obtenidos de la dureza total arrojan resultados que oscilan entre 52 y 618 mg/L. Se observa que hacia el suroeste de la cuenca los valores tienden a ser mayores que hacia el centro y norte. La mayoría de los pozos arrojan valores por debajo del límite de 500 mg/L del Decreto 3.219. La dureza del calcio está entre indetectable y 295 mg/L. La dureza del magnesio varía entre 22 y 232 mg/L.

Cloruros. Los resultados del análisis de las muestras indican concentraciones de cloruro 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. Dado que el límite es de 600 mg/L en el decreto 3219, y de 300 mg/L en las normas sanitarias para agua potable, se observa que es un parámetro que se cumple a cabalidad.

Sulfatos. Varían de 40 a 461 mg/L. Dado que el límite establecido en el decreto 3219 es de 400 mg/L, se observa que en algunos casos se supera moderadamente, siendo estos los correspondientes a pozos ubicados más al sur, en el municipio de Los Guayos, más cerca del

Lago de Valencia, mientras que en los pozos ubicados en San Diego el nivel es menor y sí cumple con el límite. La consecuencia es que en los pozos situados al sur de la zona de la cuenca el agua no es apta para el abastecimiento doméstico.

Nitratos. Los valores obtenidos para este parámetro van desde no detectado hasta 18 mg/L. El Decreto 3219 indica como parámetro nitratos + nitritos como N, el cual debe ser inferior a 10 mg/L. Al igual que con los sulfatos, los valores más altos de nitrato se presentan 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 menos. No existe regulación de este elemento en el Decreto 3219.

Sodio. Va desde cero (no detectable) hasta 219 mg/L. Este valor máximo se encuentra en los pozos ubicados más al sur, ya en el municipio de Los Guayos. No está mencionado en el decreto 3219 pero sí en el reglamento de agua potable, donde se establece que debe ser inferior a 200 mg/L en agua potable.

Sólidos disueltos. Se encuentran valores entre 87 y 1.384 mg/L, siendo mayores 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 mayor mineralización del agua del sur.

Conductividad eléctrica. Se encuentra entre 200 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$ hacia el norte del acuífero y 2340 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$ hacia el extremo sureste. Este parámetro no está regulado en el Decreto 3219 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 concentraciones bajas a moderadas de minerales disueltos, pero en el sur es mayor, lo que puede explicarse por la intrusión de las aguas salobres del lago de Valencia.

En resumen, la mayoría de los parámetros fisicoquímicos del agua del acuífero tienen variaciones espaciales, encontrándose que el norte y centro del acuífero tienen valores bajos o medios, y el extremo sur (pozos N° 26, 27 y 28) tienen los mismos valores más altos asociados a una alta mineralización. La causa más probable es la intrusión de agua salobre del lago de Valencia al acuífero, principalmente durante la estación seca cuando no hay infiltración directa del agua de precipitación; mientras que al norte y el perímetro montañoso de la cuenca existe una recarga natural del acuífero de menor mineralización, probablemente de origen geológico.

En cuanto a las variaciones en el tiempo, según cifras del trabajo de Márquez, Guevara y Rey (2018), en el período analizado estas variaciones de los parámetros físico-químicos no son significativas, debido a que existen valores similares de cada parámetro desde el año 2015 hasta

2018.

Estimación de los parámetros geofísicos e hidráulicos del acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo, Venezuela

Estimación de los parámetros geofísicos del acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo, Venezuela

El conjunto de litologías recopiladas a partir de los registros del Ministerio de Ecosocialismo y Aguas ofrece una descripción del subsuelo en la zona del acuífero en cada sitio donde se han perforado pozos profundos (Figura 11). La litología del suelo muestra características esenciales, ya que el tipo de suelo en cada nivel está asociado a la presencia de estratos acuíferos, acuitardos o acuicludos, y por tanto se relaciona con la condición de los estratos acuíferos como libres, confinados o semiconfinados (Bear y Cheng, 2010).

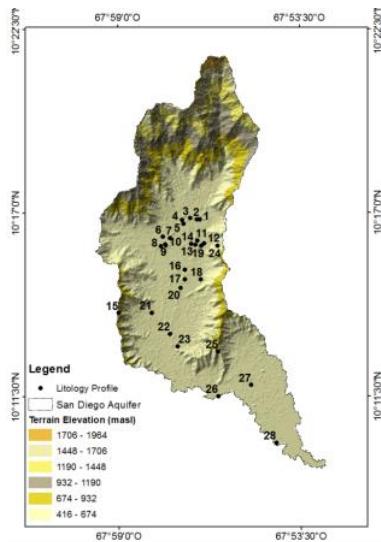


Figura 11: Identificación en la zona del acuífero de 28 pozos con registro de perfiles litológicos y datos de relieve.

Fuente: Márquez, Guevara y Rey (2018)

Teniendo en cuenta que las propiedades hidráulicas más importantes de un acuífero son la de almacenar agua y transmitirla, se presentan los valores de porosidad efectiva, el coeficiente de almacenamiento S , la conductividad hidráulica y la transmisividad T . En la Tabla 9 se muestra el listado de perfiles obtenidos con los datos de los pozos registrados en el 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 promedio de estos estratos.

Tabla 9: Resumen de parámetros geofísicos litologías, porosidad efectiva y permeabilidad en registros de 28 pozos del acuífero San Diego, estado Carabobo.

Perfil Nro.	Litologías predominantes	Espesor de estratos permeables (m)	Profundidad de los estratos permeables (m)	Porosidad efectiva	Permeabilidad K (m/día)
1	SM, SO, 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, SO, 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, SO	13	75	0,33	100
9	CL, SC, GW, SW	15	67	0,36	1.000
10	CL, SO	16	123	0,30	11
11	CL, GW, CL	19	50	0,36	1.000
12	VL, SO, CL	20	40	0,30	100
13	CL, SO, GW, CL	15	50	0,33	1.000
14	VL, SO, GW, CL	50	36	0,30	1.000
15	CL, SO, GW, R	30	32	0,30	1.000
16	SM, SO, GW	40	37	0,32	1.000
17	SM, CL, R	-	-	0,25	10
18	SO, SC, GW, R	9	9	0,27	1.000
19	CL, GW, CL, GW	16	30	0,27	1.000
20	VL, SO, GW, GC	48	42	0,34	1.000
21	VL, CL, SO	20	30	0,30	1.000
22	SC, CL, SO, GW	24	70	0,30	-
23	CL, GW, CL, SO	18	34	0,32	-
24	SO, CL, GW, R	12	40	0,30	-
25	CL, GW, SO	14	40	0,32	-
26	CL, SO, GW	23	39	0,30	-
27	SO, GW, GC	30	40	0,32	-
28	SO, SC, CL	30	50	0,32	-

Fuente: Elaboración propia (2024).

Aquí se observa en primer lugar la alternancia entre capas de materiales granulares permeables (arena bien clasificada SW, grava bien clasificada GW) y capas de materiales impermeables (arcilla CL de baja compresibilidad, limo ML de baja compresibilidad). Al detallar la ubicación de cada pozo, se encuentra que los ubicados al norte de la cuenca presentan principalmente material tipo CL y GW; en el centro y sur existen estratos de CL y SW. En la Tabla 9 se muestran los valores aproximados de porosidad y permeabilidad efectiva, con base en el trabajo de Márquez, Guevara y Rey (2018), siendo estimados a través de la clasificación litológica de los estratos.

Estimación de los parámetros hidráulicos del acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo, Venezuela

Los resultados de las estimaciones de los parámetros hidráulicos del acuífero del municipio de San Diego se muestran en la Tabla 10, Figuras 12 y 13, compuestas por la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento arrojaron valores medios de $50,46 \text{ m}^2/\text{día}$ y $8,9 \times 10^{-5}$, respectivamente, presentando una alta variabilidad que estuvo asociada a la capacidad de los equipos de bombeo utilizados en cada pozo, como se observa en la Figura 3, el flujo de bombeo aumentó del sector norte al sector industrial en el orden de 5 a 20 veces, lo que provocó que incidiera en el aumento de la transmisibilidad del acuífero y una consecuente disminución en el coeficiente de almacenamiento.

En la Figura 12 se observa que el coeficiente de almacenamiento fue menor a 1×10^{-4} con una frecuencia de ocurrencia entre 60 y 70 %. Según Bear y Cheng (2010), el coeficiente de almacenamiento que varía entre 1×10^{-4} y 1×10^{-5} corresponde a un acuífero kárstico confinado formado a partir de calizas y dolomías, lo cual concuerda con los valores significativos encontrados para el bicarbonato de calcio, discutido en la sección anterior.

Tabla 10: Resumen de los parámetros estadísticos de los coeficientes de transmisividad y almacenamiento en el acuífero del municipio de San Diego en el periodo 2015-2019.

Parámetros estadísticos	Transmisividad (T)	Coeficiente de almacenamiento (S)
Tamaño de la muestra	20	20
Significar	50,46	0,000089
Desviación Estándar	125,20	0,00016
Coeficiente de variación	248,08 %	189,14 %
Mínimo	3,46	0
Máximo	570,72	0,00043
Rangoaaa	567,26	0,00043
Asimetría estándar	7,61	2,93
Curtosis estándar	16,44	0,64

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Fariás y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

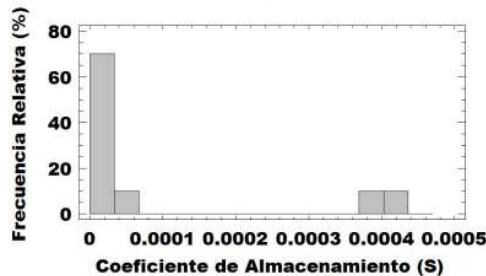


Figura 12: Frecuencia de ocurrencia del coeficiente de almacenamiento acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo durante el periodo 2015-2018.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

En la Figura 13 se observa que la transmisividad $< 50\text{m}^2/\text{día}$ se presentó con una frecuencia del 80 %, según Bear y Cheng (2010), la transmisividad variando entre 10 y 100 $\text{m}^2/\text{día}$ es un valor muy de baja a baja, lo cual ocurrió en el área de uso residencial del acuífero del Municipio de San Diego (Figura 13).

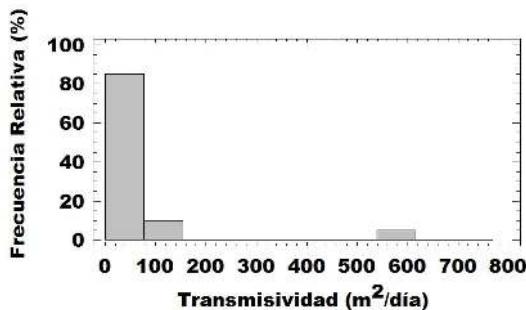


Figura 13: Frecuencia de ocurrencia del coeficiente de transmisividad del acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo durante el periodo 2015-2019.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Farías y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

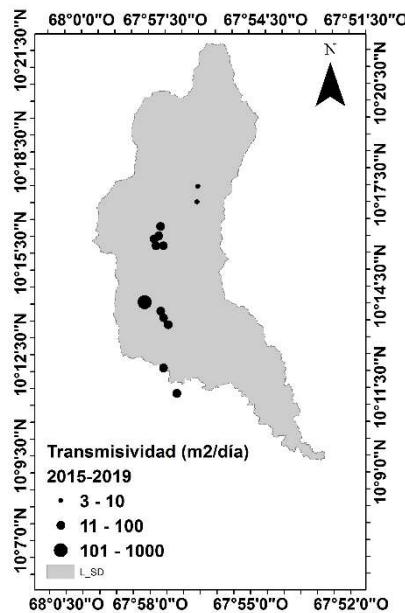


Figura 14: Distribución espacial del coeficiente de transmisividad del acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo durante el periodo 2015-2019.

Fuente: Elaboración propia (2024). Adaptado de Márquez, Mercado y Rodríguez (2015), Márquez, Daza y Terán (2015), Márquez, García y Mendoza (2015), Márquez, Jiménez y Cruz (2015), Márquez, García y Ramírez (2015), Márquez, Fariás y Vallejo (2016), Márquez, Palma y Vegas (2016), Márquez, Hernández y Vázquez (2016), Márquez, Carrizales y Urdaneta (2017), Márquez, Montilla y Quiñonez (2017), Márquez, Delgado y Vera (2017), Márquez, Quintero y Romero (2017), Márquez, Segura y Rodríguez (2017), Márquez, Cordero y Jiménez (2017), Márquez, Flores y Urdaneta (2018), Márquez, Monsalve y Villareal (2018), Márquez, Martín y Álvarez (2018), Márquez et al. (2019), Márquez, García y Cárdenas (2017), Márquez et al. (2021).

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

Las Tablas 11, 12, 13 y 14 resumen la precipitación, evapotranspiración, infiltración y volumen extraído donde se muestran los valores mínimo y máximo y el valor acumulado en la cuenca se calcula con el promedio de ambos valores. El equilibrio de la cuenca se puede expresar con la ecuación (4), que establece que el aporte de la precipitación (en un período de tiempo determinado) debe ser igual a la suma del escurrimiento más la evapotranspiración más la infiltración. Se considera que los datos disponibles en las fuentes consultadas no permiten un cálculo preciso de los componentes del balance, debido principalmente a la ausencia de datos de escorrentía superficial. Sin embargo, los mismos datos muestran el orden de magnitud de los componentes esenciales del balance.

Tabla 11: Precipitación en la zona del acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo, expresada en mm totales por mes.

Mes	E	F	M	A	MAY	J	JUL	A	S	O	N	D	Suma
Año 2015													
Mínimo	3	6	0	21	35	25	106	168	128	74	50	18	634
Máximo	5	11	4	44	74	61	167	403	178	132	77	22	1.178
Año 2016													
Mínimo	0	0	0	131	102	121	153	103	248	113	275	18	1.264
Máximo	1	1	4	201	165	239	168	223	231	142	311	21	1.707
Año 2017													
Mínimo	7	0	11	197	114	291	270	-	-	-	-	-	890
Máximo	12	12	15	202	126	298	275	-	-	-	-	-	940

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 12: Evapotranspiración en el área del acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo, expresada en mm totales por mes.

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

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 13: Infiltración en el área del acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo, expresada en mm totales por mes.

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

Fuente: Elaboración propia (2024).

Tabla 14: Volumen extraído con pozos profundos del acuífero del municipio San Diego, estado Carabobo, expresado en m³/año.

Año	Volumen extraído (m ³ /año)	Caudal medio de bombeo (L/s)
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

Fuente: Elaboración propia (2024).

Análisis de la influencia de los constituyentes hidrogeoquímicos del acuífero en el uso sostenible del agua

Para establecer el uso sustentable del agua subterránea se deben considerar los siguientes aspectos: a) disponibilidad del recurso hídrico, b) tasa de extracción y rendimiento seguro, c) calidad, d) protección ambiental de las áreas de recarga, e) planificación del sistema de abastecimiento basado en la gestión integrada de recursos.

Disponibilidad de recursos hídricos

Con base en el concepto de porosidad y permeabilidad efectiva se realizó una estimación del volumen de agua subterránea potencialmente extraíble, que es la base para el cálculo de la disponibilidad, encontrando que el caudal máximo de extracción sería de 1.390 L/s.

Estimación del volumen almacenado

1. Área total del acuífero: $Aa = 117Km^2$
2. Espesor promedio de acuífero (hac). Se toma del promedio de los espesores de la Tabla 9: $hac = 23m$
3. Volumen total del acuífero (Vac)

$$Vac = 117 \times (10^6 m^2/Km^2) \times 23m = 26,910 \times 10^9 m^3 = 26.910 Km^3$$

4. Porosidad total = entre 12 y 40 %
5. Porosidad eficaz = 0,32

6. Volumen de agua que puede almacenar el acuífero (V_a):

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

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:

$$Vol. Aguarecibe = 0,37m/a \times 117 \times 106m^2 = 43,3 \times 106m^3/a$$

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

$$8. Q_{\max} = 43,3 \times 10^6 m^3/a \times (1/(12meses \times 30dias \times 24h)) = 5.010 m^3/h$$

$$Q_{\max} = 1.390 L/s$$

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

Tasa de extracción

No existe un criterio único para establecer cuál es la tasa de extracción que implique un equilibrio entre el aporte de agua o recarga y la extracción. Teóricamente, si se bombearan 1.390 L/s cada año, ese volumen sería reemplazado por recarga y el nivel del agua en el acuífero tendería a permanecer estable. Pero la realidad es que el acuífero como sistema tiene las siguientes características: a) es heterogéneo en su totalidad; b) la extracción por bombeo utiliza agua de diferentes capas acuíferas, que pueden ser de tres tipos: libres, confinadas y semiconfinadas, lo que implica diferentes efectos en la reducción del nivel piezométrico; c) se desconoce el ritmo de recarga, pero la existencia de capas impermeables alternas con las del acuífero implica que los tiempos de recarga del acuífero confinado deben ser muy largos, del orden de décadas o cientos de años.

Por otro lado, se revisa la demanda de agua del sistema de acueducto en la zona de estudio y su comparación con el aporte de agua subterránea y agua del sistema principal. Las demandas de agua potable para la zona del acuífero se basan en datos poblacionales obtenidos del Instituto Nacional de Estadística (2014), con una tasa de crecimiento aritmético del 4% anual. Se calcula con el valor de consumo per cápita recomendado en las normas del Instituto Nacional de Obras Sanitarias, de 300 litros/persona-día ($L/p - dia$).

Calidad del agua extraída

La calidad del agua que se extrae en el norte y centro de la zona del acuífero es buena, lo que permite clasificarla como tipo 1A, según el Decreto 883 e incluso clasificarla como “agua potable” según normas sanitarias, previa desinfección. Esto significa que se puede considerar conveniente la extracción de agua subterránea para incorporarla directamente a las redes de acueductos de San Diego, confirmando uno de los requisitos para que su explotación sea sostenible. Por otro lado, los niveles de mineralización hacia el extremo sur del acuífero no se corresponden con el uso para abastecimiento urbano.

Gestión integrada de los recursos hídricos

Los resultados de esta investigación respecto a las características hidrogeológicas del acuífero, la calidad del agua y su disponibilidad, permiten proponer un modelo de gestión para el uso del agua subterránea de manera integrada con el sistema de abastecimiento del municipio de San Diego desde el Sistema Regional Central. Está comprobado que actualmente se aprovechan ambas fuentes de agua, pero no de manera planificada e integrada.

La producción de pozos profundos actualmente satisface las necesidades de algunas personas, urbanizaciones o empresas que no reciben regularmente agua del sistema principal y por lo tanto, ya sea por la empresa hidrológica, el gobierno local o regional, o por cuenta propia, han construido sus pozos profundos y por lo tanto tienen esta fuente alternativa únicamente. Por esta razón, el flujo proveniente de los pozos, en su mayor parte, se incorpora de forma sectorizada a porciones de las redes de distribución, sin opción a redistribuir estos flujos (Sánchez, 2013).

Es importante señalar que la producción total de los pozos profundos es del orden de 400 L/s, lo que no cubre el suministro planificado para la población, superior a los 500 L/s, por lo que actualmente no es posible cubrir la demanda de agua sin el suministro de agua de San Diego por parte del Sistema Regional Central. A través de este sistema hay un aporte muy variable que promedia 250 L/s durante los períodos de bombeo. Sin embargo, este bombeo se realiza en ciclos de 72 a 96 horas como máximo, cada semana, de 168 horas semanales, por lo que 250 L/s en realidad equivalen a un promedio de 110 a 180 L/s.

Conclusiones

Los resultados de este trabajo han demostrado que en la cuenca existe diversidad de condiciones hidrogeológicas del subsuelo, encontrando que su litología y otras características físicas no son uniformes en todos los sitios estudiados. Dentro de la variedad de 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 semiconfinadas y confinadas.

En cuanto a la calidad del agua, se concluye que la extracción e incorporación de agua subterránea a las redes de acueductos locales en el área de estudio, el municipio de San Diego, es factible, requiriendo únicamente una desinfección previa.

Los resultados de los estudios realizados en el periodo 2015 al 2018 muestran que la variación en el tiempo de los constituyentes hidrogeológicos y físico-químicos no es significativa, aunque es un periodo corto, implica condiciones estables en la hidrología y composición del acuífero. Por otro lado, es notable la variación espacial de estos parámetros, destacando la diferencia en la calidad del agua proveniente del norte y centro de la cuenca, respecto a la de los pozos ubicados más al sur, donde se destaca la alta presencia de minerales y otros constituyentes implica que no es un tipo adecuado para incorporarse directamente al suministro de agua.

El balance de los aportes de agua para abastecimiento urbano en el área de San Diego permite establecer que en las condiciones actuales, el aporte de agua subterránea es requerido, ya que el Sistema Regional Central abastece sólo la mitad de la demanda de manera irregular en promedio. Los pozos profundos que existen actualmente han sido construidos para atender necesidades específicas de planificación urbanística o de determinados sectores o industrias, cumpliendo ese papel hasta el momento, pero hay que considerar de forma decisiva la forma en que se puedan distribuir estos caudales a toda la red, bajo gestión. la empresa hidrológica o la autoridad municipal.

La fuente subterránea tiene las condiciones para complementar la demanda de forma sostenible, pero la forma en que se utiliza actualmente no se basa en un modelo de gestión integrada adecuado de ambos suministros.

Referencias

- Aguerrevere, S., y Zuloaga, G. (2003). *Observaciones geológicas en la parte central de la cordillera de la costa - Venezuela*. Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat.
- American Water Works Association. (1998). *A100-97: AWWA Standard for water wells*. ANSI/AWWA. <https://studylib.net/doc/27021451/a100-97>
- Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela. (2007). *Ley de Aguas*. Gaceta oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 38595. <https://www.asambleanacional.gob.ve/storage/documentos/leyes/ley-de-agu-20220208194620.pdf>
- Bear, J., y Cheng, A. (2010). *Modelado del flujo de aguas subterráneas y el transporte de contaminantes*. Saltador.

- Centro de Pensamiento Independiente. (2016). *Informe Nacional Voluntario de Venezuela ante el Foro Político de Alto Nivel de las Naciones Unidas de 2016*. CEPEI. https://cepei.org/wp-content/uploads/2021/05/VNR_Venezuela_V2.pdf
- Cunningham, W., y Schalk, C. (2014). *Procedimientos técnicos de aguas subterráneas del Servicio Geológico de Estados Unidos: Técnicas y métodos del Servicio Geológico de EE. UU.* 1-A1. USGS.
- Galán, C., y Herrera, F. (2017). Ríos subterráneos y acuíferos kársticos de Venezuela: inventario, situación y conservación. *Ríos en riesgo*, 1, 153-171.
- Guevara, E., y Cartaya, H. (2004). *Hidrología ambiental*. Universidad de Carabobo.
- Hengl, T. (2007). A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. *Office For Official Publications Of The European Communities*, 140. <https://is.muni.cz/publication/851115/en/A-Practical-Guide-to-Geostatistical-Mapping-of-Environmental-Variables/Hengl>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw Hill.
- Huguet-Sierra, G., y Márquez, A. (2021). *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* [Tesis de maestría]. Universidad de Carabobo. <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/8824>
- Huguet-Sierra, G., Márquez-Romance, A., Guevara-Pérez, E., Pérez-Pacheco, S., y Buroz-Castillo, E. (2023). Sustainable use of water from a tropical aquifer. *Environmental Quality Management*, 33(1), 257-277. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tqem.22053>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2007). *NTC 5539 Pozos Profundos de Agua*. icontec. <https://www.icontec.org/rules/pozos-profundos-de-agua/>
- Instituto Nacional de Estadística. (2014). *XIV Censo nacional de población y vivienda: Resultados total nacional de la República Bolivariana de Venezuela* (G. G. de Estadísticas Demográficas, Ed.). Gerencia de Censo de Población y Vivienda. <http://www.ine.gob.ve/documentos/Demografia/CensodePoblacionyVivienda/pdf/nacional.pdf>
- International organization for standardization. (2017). *ISO/IEC 17025:2017: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. Online Browsing Platform. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-3:v1:en>
- Kirsch, R. (2006). *Groundwater geophysics: A tool for hydrogeology* (R. Kirsch, Ed.; 2.^a ed.). Springer. <https://acortar.link/D6vyas>
- Márquez, A., Absalón, O., y 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; Longitud: 67°57'42.68.º, periodo 2019* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/8748>

- Márquez, A., y Carrillo, F. (2015). *Vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero del municipio de San Diego, Estado Carabobo* [Tesis de Maestría]. Universidad de Carabobo. <http://www.riuc.bc.edu.ve/bitstream/123456789/2420/1/vcarrillo.pdf>
- Márquez, A., Carrizales, A., y Urdaneta, L. (2017). *Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del municipio san diego durante el 2017: Sector centro* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://riuc.bc.edu.ve/handle/123456789/8737>
- Márquez, A., Cejas, E., y Sánchez, F. (2019). *Análisis de la variación de los parámetros hidráulicos en el acuífero del municipio San Diego: Sector norte - c, pozo n°6. Coordinación. Lat.: 10°15'42.4"N; Largo: 67°57'47.7"O, periodo 2018-2019* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://riuc.bc.edu.ve/handle/123456789/8747>
- Márquez, A., Cordero, P., y Jiménez, R. (2017). *Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del Municipio San Diego durante 2017: Sector norte* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://riuc.bc.edu.ve/handle/123456789/8739>
- Márquez, A., Daza, B., y Terán, F. (2015). *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. <http://riuc.bc.edu.ve/handle/123456789/8729>
- Márquez, A., Delgado, C., y Vera, A. (2017). *Estimación de parámetros hidráulicos en el acuífero del municipio san diego, estado Carabobo en el año 2017: Sector zona industrial* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://riuc.bc.edu.ve/handle/123456789/8738>
- Márquez, A., Fariás, Y., y Vallejo, M. (2016). *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. <http://riuc.bc.edu.ve/handle/123456789/8735>
- Márquez, A., Flores, A., y Urdaneta, S. (2018). *Análisis de la variación de los parámetros hidráulicos en el acuífero del municipio San Diego: Sector centro-b* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://riuc.bc.edu.ve/handle/123456789/8745>
- Márquez, A., García, B., y Mendoza, E. (2015). *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. <http://riuc.bc.edu.ve/handle/123456789/8736>
- Márquez, A., García, E., y Cárdenas, M. (2017). *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; Longitud: 67°57'34.30.º, período 2019* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo.
- Márquez, A., García, R., y Ramírez, E. (2015). *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. <http://riuc.bc.edu.ve/handle/123456789/8731>

- Márquez, A., Guevara, E., y Rey, D. (2018). Modelación Geoestadística Espacio-temporal de Parámetros Hidrogeoquímicos en el Acuífero de San Diego, Venezuela. *Journal of Remote Sensing GIS and Technology*, 4(3). <http://matjournals.in/index.php/JORSGT/article/view/2799>
- Márquez, A., Hernández, C., y Vázquez, F. (2016). *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. <http://riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/8734>
- Márquez, A., Jiménez, L., y Cruz, E. (2015). *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. <http://riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/8730>
- Márquez, A., Martín, P., y Álvarez, Y. (2018). *Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del municipio san diego durante 2018: Sector centro-A* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/8743>
- Márquez, A., Mercado, A., y Rodríguez, R. (2015). *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. <http://riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/8732>
- Márquez, A., Monsalve, G., y Villareal, H. (2018). *Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del municipio san diego durante 2018: Sector centro-a* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/8742>
- Márquez, A., Montilla, A., y Quiñonez, A. (2017). *Análisis de los parámetros hidráulicos del acuífero del municipio san diego durante 2017: Sector industrial* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/8744>
- Márquez, A., Palma, M., y Vegas, D. (2016). *Estimación de parámetros hidráulicos del acuífero del municipio San Diego, Estado Carabobo. Zona norte* [Tesis de licenciatura]. Universidad de Carabobo. <http://www.riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/5465>
- Márquez, A., Quintero, G., y Romero, M. (2017). *Evaluación del proceso de descarga - recarga del acuífero, Municipio San Diego del Estado Carabobo* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/8740>
- Márquez, A., Segura, J., y Rodríguez, M. (2017). *Estimación de los parámetros hidro-geoquímicos del acuífero de San Diego, caso período lluvioso 2017* [Tesis de pregrado]. Universidad de Carabobo. <http://riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/874>
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology And The Bulletin Of The Society Of Economic Geologists*, 58(8), 1246-1266. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>
- Merkel, B., y Planer-Friedrich, B. (2005). *Groundwater geochemistry: A practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems* (D. K. Nordstrom, Ed.). Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/b138774>

- National Development Planning Commission. (2019). *GHANA: Voluntary National Review Report on the Implementation of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. NDPC. https://ghana.un.org/sites/default/files/2019-10/23420VNR_Report_Ghana_Final_print.pdf
- Potter, M., Wiggert, D., y Ramadan, B. (2012). *Mechanics of Fluid* (4.^a ed.). CENGAGE Learning.
- Rice, E., Bridgewater, L., Association, A. P. H., Association, A. W. W., y Federation, W. E. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. <https://books.google.co.ve/books?id=dd2juAAACAAJ>
- Sánchez, J. (2013). *Reingeniería de la aducción de agua potable comprendida desde la estación de bombeo Castillito, municipio San Diego, estado Carabobo* [Tesis de maestría]. Universidad de Carabobo.
- Theis, C. (1935). La relación entre el descenso de la superficie piezométrica y la velocidad y duración de la descarga de un pozo que utiliza almacenamiento de agua subterránea. *Eos, Transacciones Unión Geofísica Estadounidense*, 16(2), 519-524. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tqem.22053>
- Urbani, F. (2005). Síntesis de la nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la cordillera de la costa, Venezuela. *Boletín Técnico*, 43(2), 1-10.
- Urbani, F., Contreras, O., y Barrios, F. (1989). Reconocimiento geológico de la región de El Palito - Valencia - Mariara - Carabobo. En S. V. de Geología (Ed.), *VII Congreso Geológico Venezolano: memoria* (pp. 175-198, Vol. 2).
- Urbani, F., Contreras, O., Barrios, F., García, I., Aranguren, A., y Uzcátegui, R. (1989). Cartografía geológica de flanco sur del macizo de El Ávila desde Maripérez hasta Izcaragua, Cordillera de la Costa, D. F. y estado Miranda, Venezuela. En S. V. de Geología (Ed.), *VIII Congreso Geológico Venezolano: memoria* (pp. 463-468, Vol. 2).
- World Forum Economic. (2020). *The Global Risks Report 2020* (15.^a ed.). https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf