

# Análisis Hidrogeoquímico del agua subterránea de Puerto Wilches, Colombia

Jaime Andrés Castañeda Gantiva

Se procedió a realizar el análisis de la composición química y la calidad del agua subterránea para un conjunto de muestras fisicoquímicas procedentes del municipio de Puerto Wilches, Valle Medio del Magdalena, Colombia. La base de datos suministrada presenta un total de 43 muestras fisicoquímicas tomadas para diversos puntos de muestreo de interés como son manantiales, pozos de abastecimiento de acueductos, aljibes de fincas y pozos profundos de particulares con profundidades entre 0 y 365 m.

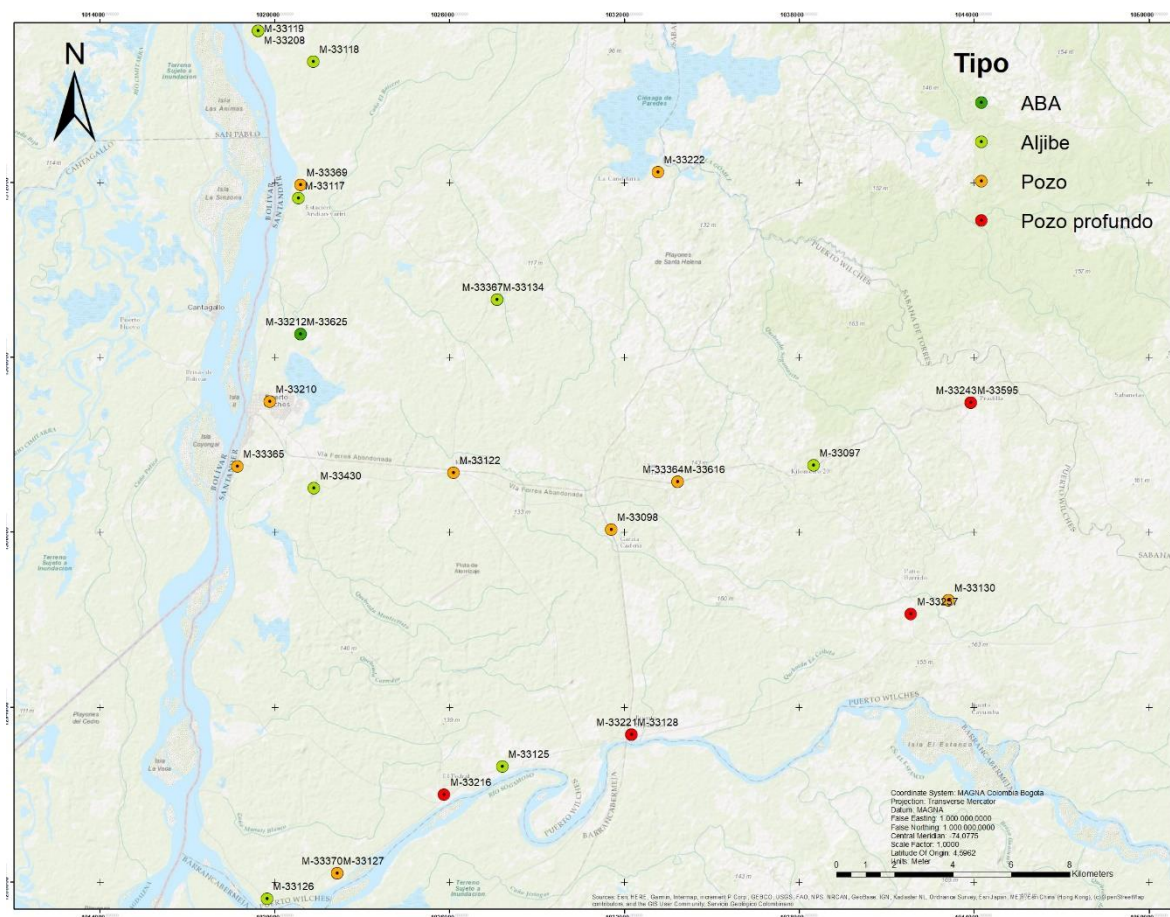
Para el análisis fueron considerados los 13 parámetros: Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Disueltos Totales (SDT), pH, Calcio -  $\text{Ca}^{2+}$ , Sodio -  $\text{Na}^{+}$ , Potasio -  $\text{K}^{+}$ , Magnesio -  $\text{Mg}^{2+}$ , Hierro Total - Fe, Cloruros -  $\text{Cl}^{-}$ , Sulfatos -  $\text{SO}_4^{2-}$ , Bicarbonatos -  $\text{HCO}_3^{-}$ , Nitratos -  $\text{NO}_3$  y Nitritos  $\text{NO}_2$ ; considerando la CE y el pH parámetros suplementarios a las concentraciones de los iones mencionados.

El primer paso consistió en la realizar una evaluación de la calidad de los datos. Esto se realizó mediante el cálculo del error analítico del balance iónico, basado en la premisa que la sumatoria de la concentración de iones y cationes en miliequivalentes debe ser igual y por lo tanto el balance iónico será igual a cero (Ecuación 1). Una vez calculados, se eliminaron las muestras cuyo error analítico estuviera fuera del rango  $\pm 10\%$ . El Mapa 1 presenta la distribución geográfica de las 29 muestras obtenidas con luego de la evaluación y clasificadas según su diseño.

$$\% \text{ de Error Analítico} = \frac{\sum \text{aniones} - \sum \text{cationes}}{\sum \text{aniones} + \sum \text{cationes}} * 100$$

(1)

**Mapa 1.** Distribución de las muestras consideradas para el análisis



Los valores estadísticos para todo el conjunto de datos determinado se muestran en la Tabla 1. En esta, los valores medios permiten ver la presencia dominante del anión bicarbonato (seguido del sulfato) y sobre los cationes la presencia de calcio y sodio.

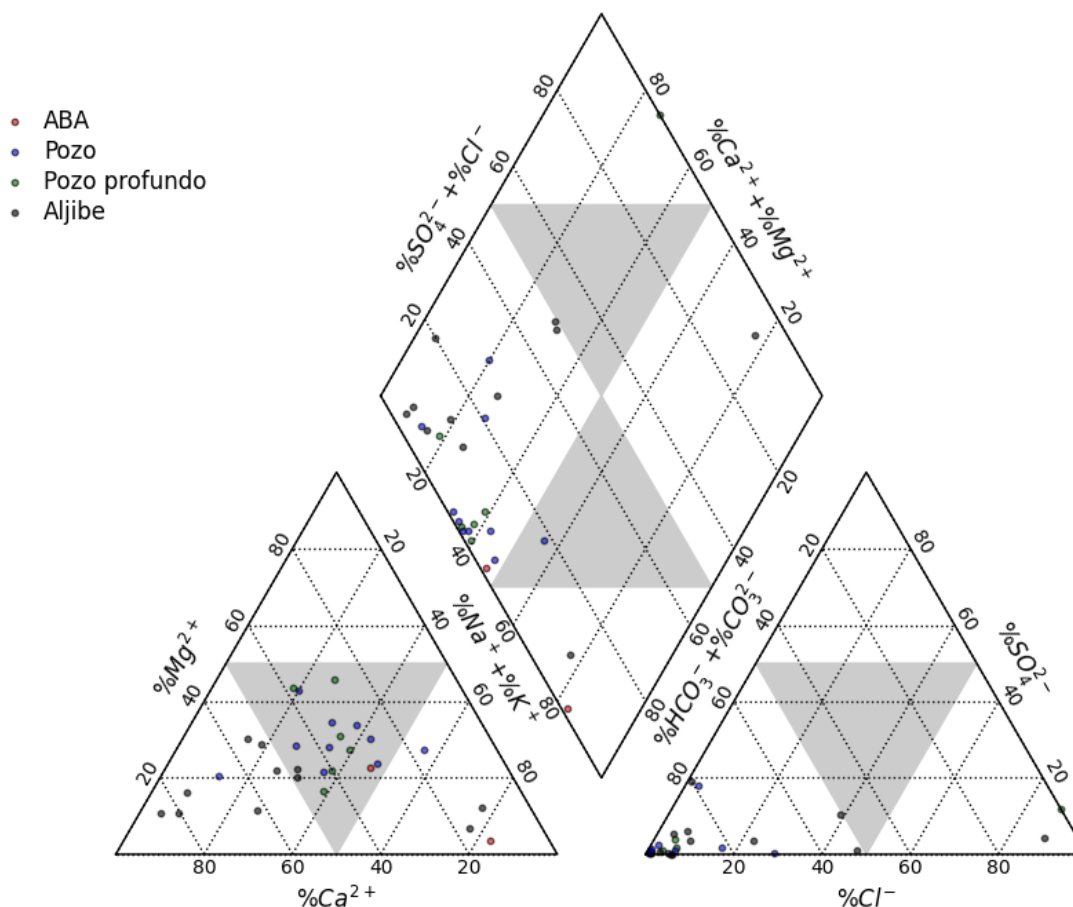
**Tabla 1.** Valores Estadísticos para las 29 muestras objeto de análisis

	pH	CE	Mg	Ca	Na	K	Fe	HCO3	Cl	SO4	NO3	NO2	SDT
Promedio	6.66	192.11	4.78	22.72	9.42	2.77	0.24	95.17	3.80	5.32	2.36	0.08	184.72
Media	6.86	162.00	4.00	9.00	8.10	2.70	0.10	74.00	2.00	0.60	0.10	0.10	170.00
Mínimo	4.12	4.14	0.50	1.00	0.80	0.40	0.05	0.00	0.20	0.05	0.05	0.05	32.00
Máximo	8.33	712.00	17.00	221.00	42.21	5.60	0.80	593.00	20.60	111.00	35.70	0.10	696.00
Desviación Estandar	0.87	150.35	3.38	42.36	7.45	1.30	0.24	112.32	4.85	20.21	6.60	0.02	123.49
Varianza	0.76	22605.51	11.41	1794.61	55.43	1.68	0.06	12615.66	23.55	408.43	43.56	0.00	15249.03
Coefficiente de Variación	13%	78%	71%	186%	79%	47%	99%	118%	128%	380%	280%	33%	67%
Asimetría	-1.13	1.68	1.48	3.73	3.00	0.18	1.17	3.20	1.93	4.93	4.45	-0.07	2.44

Concentraciones en mg/L, CE en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Como primer método para interpretar la información hidrogeoquímica de la zona consistió en la construcción de Diagramas de Piper mediante el paquete *QChartPy* para Python (<https://github.com/jyangfsu/WQChartPy>). En la Figura 1 se observa una tendencia no dominante en los cationes y en los aniones hacia la presencia de bicarbonato. El diagrama permite ver que la facie hidrogeoquímica dominante corresponde a la bicarbonatada cálcica.

**Figura 1.** Diagrama de Piper para las muestras individuales



A continuación, se procedió con la aplicación del análisis estadístico multivariado para la muestra de datos utilizando el paquete estadístico FactoMineR. Para esto fue necesario realizar la normalización de los datos de manera que cada uno de los parámetros tuviera un mismo peso en el análisis, retirando así la condición de escala y unidades que maneja cada parámetro.

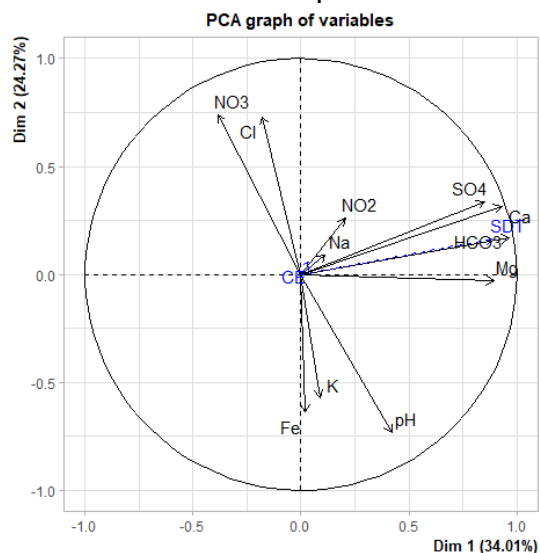
Se utilizó la función (PCA) de FactoMineR para la obtención del análisis de componentes principales, con el cual se determinaron tres componentes principales que representan el 71.1% de la variabilidad de los datos como se muestra en la Tabla 1. Se observa en negrilla una mejor representación de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  dentro del componente 1 y de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  en los componentes 2 y 3.

El diagrama de correlaciones permite ver que al lado derecho se encuentran las muestras con mayor cantidad de iones, agua con mayor mineralización; estando arriba las muestras con mayor concentración de NO<sub>3</sub> y Cl y abajo las mayores concentraciones de Fe y K. Se presentan así, correlaciones de tipo negativo entre NO<sub>3</sub> y Cl frente a pH, K y Fe (Figura 2).

**Tabla 2.** Resultados del Análisis de Componentes Principales.

Variables	Dim.1	Dim.2	Dim.3
pH	0.420	-0.733	0.537
Mg	<b>0.895</b>	-0.029	0.001
Ca	<b>0.931</b>	0.317	0.101
Na	0.112	0.090	0.008
K	0.087	-0.573	0.329
Fe	0.020	-0.637	0.406
HCO <sub>3</sub>	<b>0.966</b>	0.172	0.030
Cl	-0.178	<b>0.730</b>	<b>0.533</b>
SO <sub>4</sub>	<b>0.850</b>	0.336	0.113
NO <sub>3</sub>	-0.384	<b>0.739</b>	<b>0.545</b>
Variance	3.741	2.669	1.420
% of var.	34.013	24.266	12.907
Cumulative % of var.	34.013	58.279	71.186

**Figura 2.** Diagrama de correlaciones para los los componentes 1 y 2.

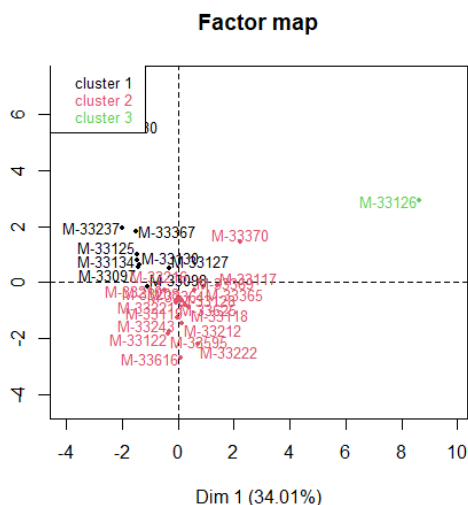


Finalmente se utilizó la función Hierarchical Clustering on Principle Components (HCPC) para ejecutar el análisis de agrupamiento jerárquico o "clustering". Este dio como resultado la obtención de 3 grupos que representan las 29 caracterizaciones fisicoquímicas consideradas, con una distribución de 9 muestras para el Grupo 1, 19 para el Grupo 2 y 1 para el Grupo 3. En la Tabla 2 se resumen los valores promedio de cada Cluster para cada una de las variables químicas analizadas, lo que permite ver como los valores del Grupo 3 se encuentran en rangos muy superiores, en comparación con los Grupos 1 y 2. En la Figura 3 se presenta la

**Tabla 3.** Valores promedio por Cluster para los parámetros químicos analizados

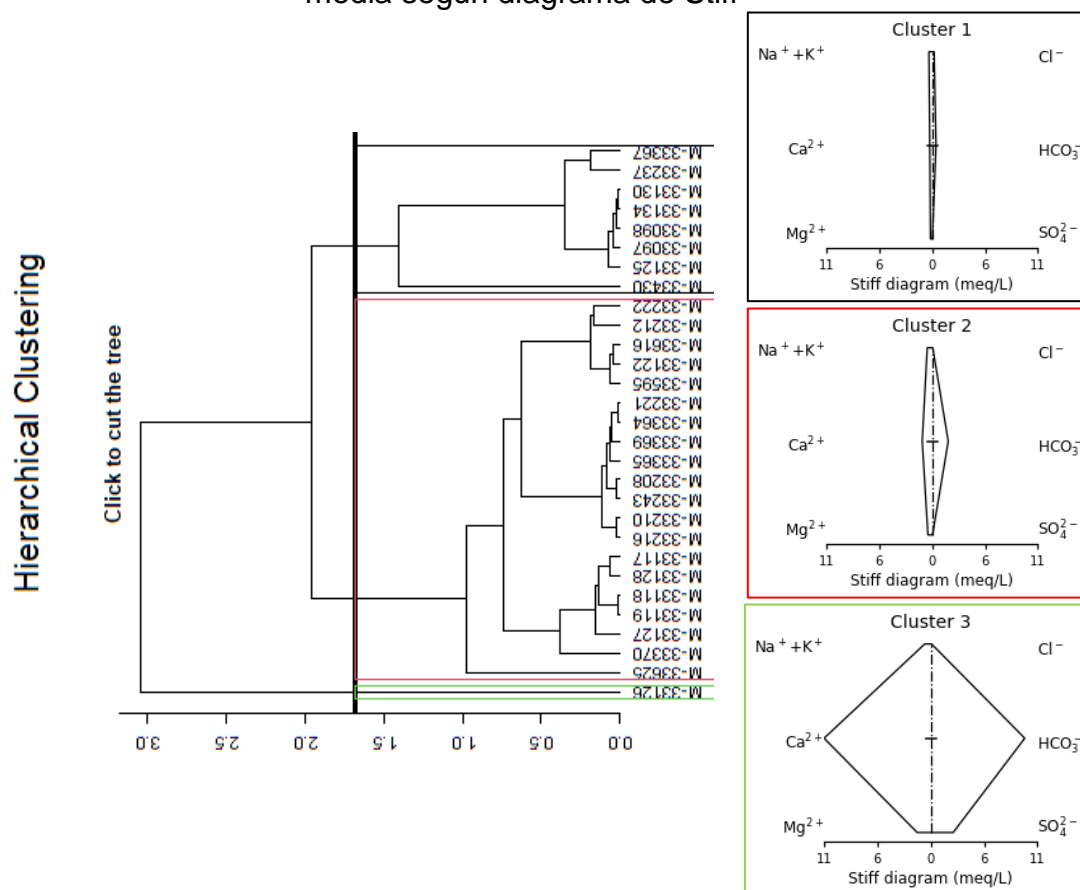
Parámetros	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
No. muestra.	9	19	1
pH	5.8	7.1	6.9
CE	151.4	221.0	8.5
Mg	2.2	5.4	17.0
Ca	5.0	20.7	221.0
Na	6.8	10.4	13.4
K	1.6	3.4	1.4
Fe	0.1	0.3	0.1
HCO3	24.7	102.4	593.0
Cl	7.3	2.2	2.9
SO4	0.9	1.8	111.0
NO3	6.7	0.4	0.2
NO2	0.1	0.1	0.1
SDT	120.3	188.3	696.0

**Figura 3.** Distribución del Análisis de Agrupamiento Jerárquico dentro de los componentes 1 y 2



Finalmente, fue utilizado el paquete *QChartPy* para generar gráficos de Stiff sobre el comportamiento medio de los parámetros en cada uno de los cluster identificados. La figura 4 relaciona los diagramas mencionados con la distribución de las muestras en la composición de los grupos a través del dendograma; esto permite reafirmar lo visto en el diagrama de Piper sobre la dominancia de la facie hidrogeoquímica bicarbonatada cálcica.

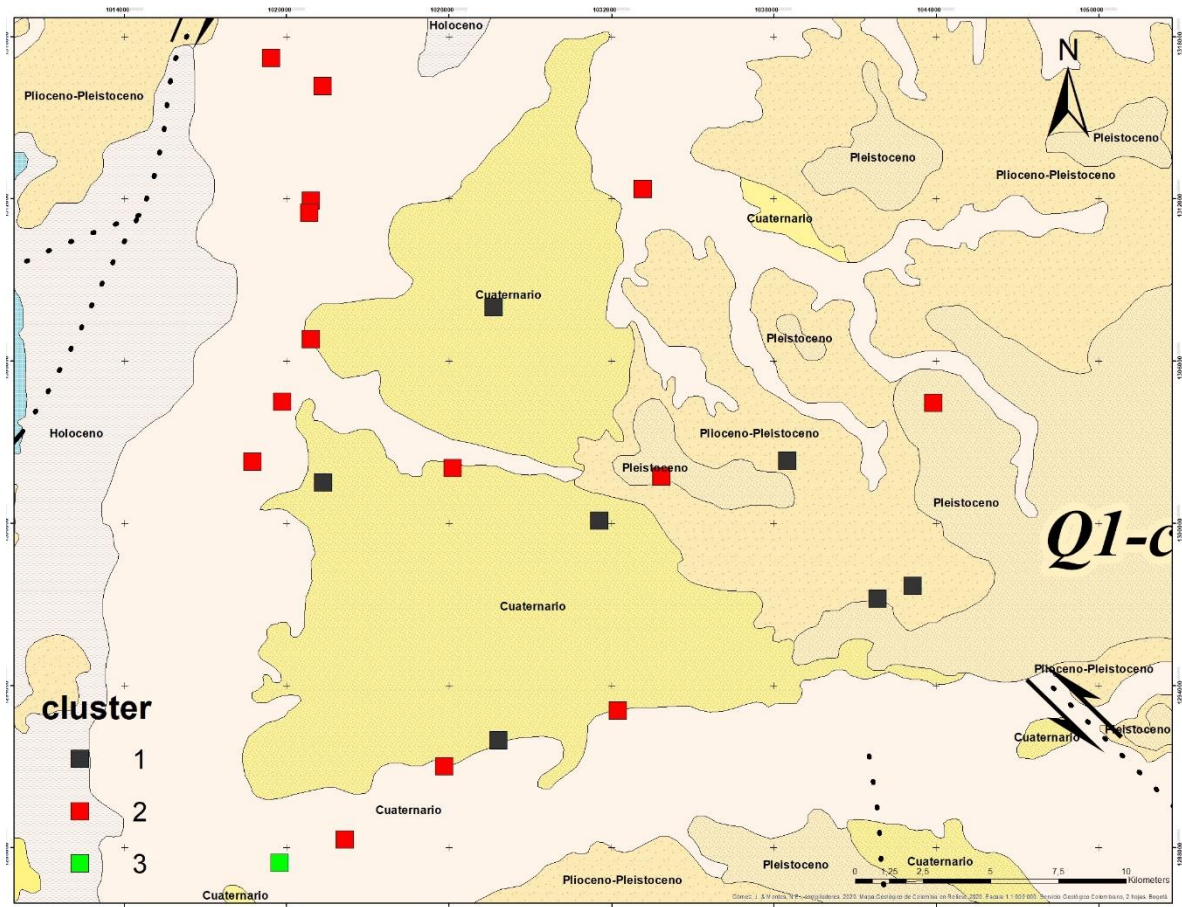
**Figura 4.** Identificación de los grupos en el dendrograma y composición química media según diagrama de Stiff



De acuerdo con los análisis realizados, se concluye que los resultados obtenidos concuerdan con lo reportando por (Malagón, Piña, Argüello & Donado, 2021) sobre el Valle Medio del Magdalena con relación a la presencia dominante de muestras de agua bicarbonatada cálcica en esta zona del país; las cuales son frecuentes de encontrar sobre depósitos cuaternarios y a poca profundidad. Esta observación es constatada con lo observado en el Mapa 2, donde se observa la distribución marcada de los Grupos 2 y 3 sobre depósitos cuaternarios.



**Mapa 2.** Distribución geográfica de los grupos identificados y geología de la zona



Basado en el Mapa Geológico 2020 ,Servicio Geológico Colombiano

## Referencias

Malagón, J.P., Piña, A., Argüello, S., Donado, L.D., 2021, Análisis hidrogeoquímico-multivariado del agua subterránea del sistema acuífero del Valle Medio del Magdalena, Colombia: Estudio a escala regional: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 73 (3), A070421. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2021v73n3a070421>