

Evaluación de la calidad del agua subterránea utilizando métodos de índice y análisis estadístico multivariado: cuenca del río Pavas (Colombia)

Groundwater quality assessment using index methods and multivariate statistical analysis: River Pavas basin (Colombia)

Cristian Camilo López Velandia^{1*} 

1 Maestría en Hidrogeología Ambiental, Universidad Antonio Nariño. Bogotá, Colombia.



Citar como: López Velandia, C. (2023). «Evaluación de la calidad del agua subterránea utilizando métodos de índice y análisis estadístico multivariado: cuenca del río Pavas (Colombia)». *South Sustainability*, 4(1), e072.
DOI: 10.21142/SS-0401-2023-e072

Artículo recibido: 30/9/2022
Revisado por pares
Artículo aceptado: 13/2/2023



© El autor, 2023. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
cristianlopezlic@gmail.com

RESUMEN

La cuenca del valle del río Pavas es una región con vocación agrícola y ganadera ubicada en el municipio de La Cumbre, departamento del Valle del Cauca, Colombia. Los habitantes se abastecen de agua proveniente de acueductos, que en épocas de déficit hídrico pueden presentar limitaciones en cuanto a la cantidad y calidad, lo que ha provocado un tránsito hacia la explotación y el uso del recurso hídrico subterráneo. Este estudio utilizó los resultados del análisis fisicoquímico y microbiológico de las muestras de agua subterránea tomadas en el área de estudio en dos periodos hidrometeorológicos diferentes (lluvioso y seco). Se aplicaron métodos de análisis estadístico (análisis de normalidad, homocedasticidad y diferencia entre poblaciones) y multivariante (análisis de componentes principales y de conglomerado jerárquico) para interpretar la hidrogeoquímica del agua subterránea. Adicionalmente, la calidad del agua fue evaluada usando los métodos de índices de calidad de agua para uso doméstico y consumo humano y para irrigación. Se evidenció la inexistencia de un efecto de los periodos hidrometeorológicos sobre el comportamiento hidrogeoquímico del agua subterránea. Adicionalmente, se estableció la existencia de factores naturales (meteorización y disolución de rocas) y antrópicos (interacción con vertimientos de origen agrícola o doméstico) que alteran la hidrogeoquímica del agua subterránea. Por último, de acuerdo con los índices de calidad de agua, las muestras de agua subterránea analizadas se ubican en la categoría «inviabile para consumo directo» por el ser humano y «sin o con bajas restricciones» para el uso de agua para irrigación.

Palabras clave: Colombia, agua potable y para irrigación, acuífero Pavas, Valle del Cauca, índices de calidad de agua

ABSTRACT

The Pavas river valley basin is an agricultural and livestock region, located in the municipality of La Cumbre, in the Valle del Cauca department of Colombia. The inhabitants are supplied by piped water, which in times of water deficit may present limitations in terms of quantity and quality, and this has led to a transition towards the exploitation and use of groundwater resources. This study used the physicochemical and microbiological analysis of groundwater samples taken within the research area during two different hydrometeorological periods (rainy and dry seasons). Statistical analysis methods (analysis of normality, homoscedasticity, and the difference between populations) and multivariate (principal component and hierarchical cluster analysis) were applied to interpret groundwater hydrogeochemistry. Additionally, water quality was evaluated using the water quality indexes methods for domestic use and human consumption and for irrigation. No evidence of an effect of hydrometeorological periods on groundwater hydrogeochemical behavior was identified. Additionally, the existence of natural factors (weathering and dissolution of rocks) and anthropic factors (interaction with discharges of agricultural or domestic origin) that alter the hydrogeochemistry of groundwater was established. Lastly, according to the water quality indices, the groundwater samples analyzed were placed in the category «unviable for direct consumption» by humans and «without or with low restrictions» for use of water for irrigation.

Keywords: Colombia, drinking and irrigation water, Pavas aquifer, Valle del Cauca, Water quality indices



Introducción

La contaminación del agua es uno de los más importantes obstáculos para el desarrollo sustentable en los países (Şener, Varol y Şener, 2021), al no permitir el acceso universal, equitativo y con condiciones idóneas de calidad de este recurso a toda la población que lo requiere (ONU, 2022). El consumo de agua contaminada o degradada puede exponer a la comunidad a riesgo de brotes de enfermedades intestinales y otras enfermedades infecciosas (OMS, 2017). En países menos adelantados y en vías de desarrollo, esta problemática es causada por la descarga de efluentes líquidos sin tratamiento previo, que provoca la reducción significativa de las condiciones óptimas de calidad para su uso en actividades domésticas, agrícolas e industriales (Seiler *et al.*, 2001). Particularmente, Colombia, un país en vías de desarrollo, presenta vertimientos puntuales o difusos a las corrientes hídricas, con altas cargas contaminantes brutas de carácter orgánico (2 823 179 t DQO/año) y nutrientes (144 989 t N_T/año; 33 165 t P_T/año) mayoritariamente de origen industrial y doméstico (IDEAM, 2019).

Debido a la presión por el uso del recurso, se ha recurrido a la extracción de agua subterránea considerada por presentar características de calidad buenas y estables comparada con el agua superficial (IGME, 1985; Wang *et al.*, 2021; Zolekar *et al.*, 2021), en vista de su limitado contacto con las actividades que se desarrollan en la superficie y al proceso de protección asociado a su filtración natural durante su percolación y transporte (Elumalai *et al.*, 2017; López Velandia, 2018). Esta situación ocurre particularmente en sectores rurales, que hacen uso del recurso para el sector agrícola (75 %) y doméstico (9 %) (IDEAM, 2019), y en donde se evidencia la ausencia de acueductos y redes de distribución en adecuadas condiciones de operación (González, Arboleda y Botero, 2015) que les provean del recurso.

Ante esta problemática, se hace necesario evaluar las condiciones de calidad del agua subterránea, las cuales no se pueden disociar con la cantidad al momento de evaluar su disponibilidad (Asare *et al.*, 2021), ya que una inadecuada calidad puede transformarse en un problema de salud pública (Jean-Eudes *et al.*, 2022). Únicamente es posible una gestión sustentable del agua si se evalúa la calidad del agua y se elaboran con estos resultados planes de manejo ambiental que consideren el uso regional de los recursos hídricos (Şener, Varol y Şener, 2021). En este estudio, métodos de análisis estadístico multivariado y de índices de calidad de agua para uso doméstico y consumo humano (ICA) y para irrigación (ICAI) fueron utilizados para interpretar la calidad del agua subterránea analizada en la cuenca del río Pavas (CRP), ubicada en el departamento del Valle del Cauca, Colombia.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La CRP (figura 1) se ubica en el municipio de La Cumbre, departamento del Valle del Cauca, Colombia, entre 3°43' - 3°36' N y 76°36' - 76°30' E, la cual presenta una temperatura media del aire de 21,3 ± 0,5 °C y una precipitación media anual de 1597 ± 224 mm, con régimen bimodal con periodos de exceso pluvial en los meses de marzo-mayo y septiembre-noviembre (Puertas Orozco, Carvajal Escobar y Quintero Angel, 2011). Como coberturas de la tierra predominantes se encuentran pastos limpios para pastoreo (38,3 %), mosaicos de cultivos (13,5 %), vegetación secundaria o en transición (27,4 %) y tejido urbano discontinuo (3,0 %) (IDEAM, 2015). Se trata de un territorio mayoritariamente rural (80 %) que desarrolla actividades agrícolas, ganaderas y producción de leche y ganado para engorde y sacrificio (Alcaldía de La Cumbre, 2020), que demandan agua cuyo origen principal son acueductos regionales, los cuales presenta limitaciones de disponibilidad (cantidad) y calidad suficiente para satisfacer las necesidades de consumo de los habitantes, particularmente en épocas de déficit hídrico (Galeano Loaiza, Bulding y Arango, 2000), por lo cual los habitantes de la región han transitado a la explotación y uso del recurso hídrico subterráneo.

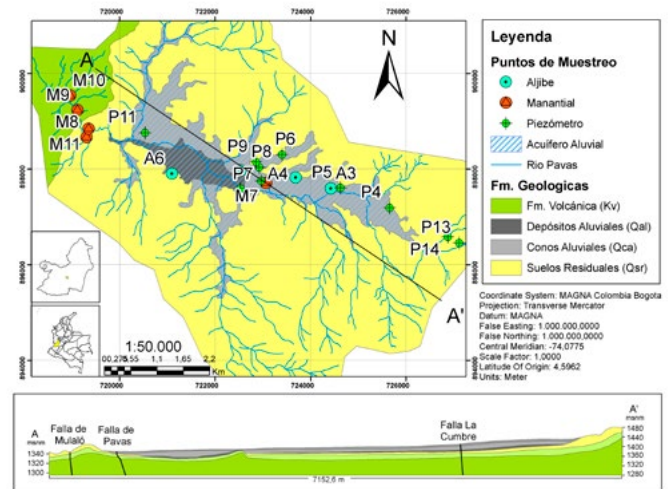


Figura 1. Mapa de localización y geológico simplificado de la CRP.

Geología e hidrogeología

La CRP es un valle intramontano conformado por el acuífero del valle del río Pavas, limitado por formaciones volcánicas (Kv) y suelos residuales (Qsr) con limitado a nulo recurso hídrico subterráneo (figura 1). Las unidades litológicas del área de estudio y sus propiedades se detallan en la tabla 1. El acuífero del valle del río Pavas, aproximadamente de 664,9 ha, acorde con Correa Basto (2020), es de tipo libre y moderadamente productivo ($K=3,79 \times 10^{-1} - 5,45 \times 10^{-1} m/día$). Está conformado por una

serie de conos (Qca) y depósitos aluviales (Qal) formados por intercalaciones de limos y arcillas con lentes de arenas, formados en un ambiente de aguas tranquilas (Correa Basto, 2020; Naranjo Henao, 2020).

Tabla 1. Unidades litológicas y propiedades hidrogeológicas

Unidad estratigráfica	Edad	Litología	Propiedades hidrogeológicas
^{1,2,3} Depósitos aluviales (Qal)	Neógeno-cuaternario	Cantos embebidos en una matriz arenosa a limosa.	Permeable (acuífero con porosidad primaria)
^{1,2,3} Conos aluviales (Qca)		Arenas finas a gruesas, en su base gravas finas a medias embebidas en limos arenosos.	Permeable (acuífero con porosidad primaria)
^{2,3} Suelos residuales (Qsr)		Diabasas producto de intensa meteorización rica en óxidos e hidróxidos de hierro, con texturas areno-limoso y limo-arcilloso.	Acuitardo
^{1,2,3} Formación volcánica (Kv)	Cretáceo	Diabasas, lavas basálticas y lavas almohadillas, con fracturaciones y alteraciones en algunos sectores, que generan suelos de textura franca a arcillosa.	Impermeable (acuífugo)

Nota. Fuente: Portilla Gamboa *et al.* (2015); Correa Basto (2020)²; Naranjo Henao (2020)³.

Muestreo y métodos analíticos

Se tomaron muestras de agua subterránea (figura 1) en enero (periodo seco, $n=18$) y octubre de 2020 (periodo lluvioso, $n=18$). Para el análisis fisicoquímico y microbiológico, las muestras fueron recolectadas y analizadas siguiendo los protocolos establecidos por el IDEAM (2007, 2022), y los métodos de análisis recomendados por Rice *et al.* (2012). Se analizó pH *in situ*, conductividad eléctrica *in situ* (EC_w), temperatura *in situ* (T), sólidos disueltos totales (SDT), bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, nitritos, calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro total, manganeso total para el análisis fisicoquímico y coliformes fecales (Col. F), coliformes totales (Col. T) y *Escherichia coli* (*E. coli*), para el análisis microbiológico.

El balance iónico de la totalidad de las muestras fue menor del 10 % (tabla 2) (López Velandia, 2023), dentro de los límites de aceptabilidad (Custodio y Llamas, 1983).

La calidad de agua para consumo e irrigación fue evaluada mediante el uso de índices de calidad de agua para uso doméstico y consumo humano (ICA) y para irrigación (ICAI) (Yidana y Yidana, 2009; IDEAM, 2013; Krishna Kumar *et al.*, 2014; Şener, Varol y Şener, 2021). Adicionalmente, se calculó la relación de adsorción de sodio (RAS) para cada muestra mediante la ecuación 1.

$$RAS = Na / [(Ca + Mg) / 2]^{1/2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Procesamiento de datos y análisis estadístico

Los resultados obtenidos para cada periodo (seco y lluvioso) fueron organizados en matrices para su análisis y evidenciar diferencias estacionales entre los datos. Se aplicó estadística descriptiva y, dado el tamaño de la muestra, se determinó la distribución de las variables para establecer adecuadamente los métodos estadísticos a aplicar. Se empleó el test de Shapiro-Wilk para evaluar la normalidad de las variables fisicoquímicas y microbiológicas a analizar. Para la comparación de los datos entre los periodos hidrometeorológicos, se analizó la homocedasticidad de las variables (test F y test de Fligner-Killeen, según su distribución estadística). Una vez validadas las condiciones necesarias, se aplicó el test T para las variables con distribución normal y el test de Wilcoxon-Mann-Whitney para las variables con distribución no normales. La totalidad de los test fueron aplicados a un nivel de significancia del 1 %.

Se aplicó el test de esfericidad de Bartlett y el índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) para cada matriz a analizar, previo al análisis de componentes principales (ACP). Valores del KMO de 0,5 a 1,0 fueron considerados como aceptables para su aplicación (Muniz *et al.*, 2020). Se realizó un ACP en modo R, para examinar los patrones o relaciones subyacentes para un gran número de variables y resumir la información en un conjunto más pequeño de componentes independientes (Davis, 2002). Adicionalmente, un análisis de conglomerados jerárquico (ACJ) en modo Q, para clasificar cualquier conjunto de observaciones con base en su homogeneidad (Yidana, Banoeng-Yakubo y Akabzaa, 2010; Şener, Varol y Şener, 2021), utilizando datos estandarizados (*z-score*), la distancia euclidiana y el método de aglomeración de Ward para vincular los grupos iniciales resultantes (Güler *et al.*, 2002; Yidana, Banoeng-Yakubo y Akabzaa, 2010). El análisis de los datos fue ejecutado a través de los *software* MS Excel v2013, Diagrammes v6.60 (Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, 2022), R v3.6.1. (R Core Team, 2015) y las librerías *psych* v2.0.12 (Revelle, 2010), *ade4* v1.7-16 (Dray y Thioulouse, 2020), *FactoClass* v1.2.7 (Pardo, Campo y Torres, 2018) y *coin* v1.4-2 (Hothorn *et al.*, 2021).



Tabla 2. Resumen estadístico de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas de precipitación y subterráneas y peso relativo de los parámetros en el área de estudio

Parámetro	Muest	n	M	DS	Me	Mín	Máx	Estándares calidad			ICA	
								OMS, 2017	R.2115 -2017	D.1594 -1984	wi	Wi
CBE (%)	ene-21	18	6,0 %	2,0 %	6,0 %	3,0 %	10,0 %					
	oct-21	18	8,0 %	1,0 %	8,0 %	6,0 %	10,0 %					
T (°C)	ene-21	18	23,25	2,42	23,45	19,90	29,40					
	oct-21	18	24,48	2,43	24,48	20,30	29,80					
pH	ene-21	18	7,05	0,52	7,08	5,90	7,90	6,5 - 8,5	6,5 - 9,0	4,5 - 9,0	1	0,02
	oct-21	18	6,55	0,94	6,55	4,00	7,70					
ECw (µS/cm)	ene-21	18	298,25	140,44	266,00	47,60	583,00	1000			4	0,06
	oct-21	18	262,14	122,85	240,50	72,00	597,00					
SDT (mg/L)	ene-21	18	198,50	75,87	181,00	87,00	356,00	500			5	0,08
	oct-21	18	197,83	81,17	191,50	62,00	424,00					
Na (mg/L)	ene-21	18	11,54	13,38	8,98	0,00	52,20	200			3	0,05
	oct-21	18	12,90	13,94	8,10	4,24	61,10					
K (mg/L)	ene-21	18	2,34	3,67	0,00	0,00	11,40					
	oct-21	18	0,53	1,54	0,00	0,00	4,90					
Ca (mg/L)	ene-21	18	28,61	11,13	26,90	5,35	47,10	300	60		3	0,05
	oct-21	18	30,48	11,85	30,15	4,06	50,20					
Mg (mg/L)	ene-21	18	13,38	6,86	10,65	2,76	29,50		36		2	0,03
	oct-21	18	14,42	6,99	13,85	1,99	32,00					
Fe (mg/L)	ene-21	18	1,00	1,16	0,46	0,00	4,10	0,3	0,3	5,0	3	0,05
	oct-21	18	0,61	1,02	0,37	0,00	4,54					
Mn (mg/L)	ene-21	18	0,50	1,14	0,04	0,00	4,67	0,1	0,1	0,2	4	0,06
	oct-21	18	0,43	0,76	0,00	0,00	2,47					
HCO ₃ (mg/L)	ene-21	18	146,44	59,78	139,50	27,30	285,00		200 ¹		2	0,03
	oct-21	18	150,19	71,89	142,50	25,00	364,00					
SO ₄ (mg/L)	ene-21	18	9,93	9,05	7,90	2,31	39,20	500	250		4	0,06
	oct-21	18	6,35	3,65	6,51	0,00	13,70					
Cl (mg/L)	ene-21	18	8,96	16,98	0,80	0,00	64,00	250	250		4	0,06
	oct-21	18	6,85	11,86	3,15	0,00	50,00					
NO ₂ (mg/L)	ene-21	18	0,00	0,01	0,00	0,00	0,06	3	0,1		5	0,08
	oct-21	18	0,02	0,07	0,00	0,00	0,29					
NO ₃ (mg/L)	ene-21	18	0,27	0,46	0,00	0,00	1,90	50	10		5	0,08
	oct-21	18	0,27	0,36	0,00	0,00	1,20					
Col. F (NMP/100 mL)	ene-21	18	425,58	756,38	104,50	0,00	2700,00		0	1000 ²	5	0,08
	oct-21	18	834,44	1251,80	125,00	0,00	4100,00					
Col. T (NMP/100 mL)	ene-21	18	14645,33	37697,92	1850,00	0,00	160000,00		0	5000 ²	5	0,08
	oct-21	18	6637,94	8047,05	3900,00	63,00	33000,00					
E. coli (NMP/100 mL)	ene-21	18	272,72	533,87	51,50	0,00	2000,00	0	0		5	0,08
	oct-21	18	220,76	445,21	15,50	0,00	1700,00					
RAS	ene-21	18	0,30	0,29	0,26	0,00	1,16					
	oct-21	18	0,08	0,01	0,08	0,06	0,10					
Peso total											∑wi = 60	∑Wi = 0

¹ Expresada como alcalinidad total.

² Cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto

Muest: muestreo; M: media; DS: desviación estándar; Me: mediana; Máx: valores máximos; Mín: valores mínimos; CBE (%): balance iónico; T: temperatura; ECw: conductividad eléctrica del agua; SDT: sólidos disueltos totales; Col. F: coliformes fecales; Col. T: coliformes totales; RAS: relación de adsorción de sodio

Índice de calidad de agua para uso doméstico y consumo humano

Es una expresión agregada y simplificada que equipondera el efecto de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en la calidad general del agua según su uso (Abbasi y Abbasi, 2012; IDEAM, 2013; Elumalai *et al.*, 2017). Se determinaron los pesos ponderales (w_i) que afectan la calidad del agua asignándoles valores de 1 a 5, con el mayor peso (5) para los parámetros que afectan mayoritariamente la calidad del agua (tabla 2). Los pesos relativos (W_i) de cada uno fueron calculados teniendo en cuenta la cantidad de parámetros (n) y el peso ponderado de cada uno de estos (w_i), mediante la ecuación 2.

$$W_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad \text{Ecuación 2}$$

Posteriormente, los valores de la escala de calificación de calidad (q_i) fueron computados usando los valores límite (S_i) para cada parámetro, determinados por las normas de calidad de agua potable (Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007; OMS, 2017), y comparados con la concentración de cada parámetro analizado (C_i), mediante la ecuación 3.

$$q_i = (C_i / S_i) \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Los valores del subíndice (SI) fueron determinados para cada parámetro multiplicando W_i y q_i , que posteriormente fueron usados para determinar el valor del ICA a través de la ecuación 4.

$$ICA = \sum S_i = \sum_{i=1}^n W_i q_i \quad \text{Ecuación 4}$$

Índice de calidad de agua para irrigación

Acorde con los parámetros y límites determinados por Ayers y Westcot (1985) para evaluar la calidad de agua para irrigación (ECw, pH, SDT, HCO₃, Cl, NO₃, Na, Fe, Mn y RAS), se asignaron los pesos relativos (w_i) en una escala de 1 (menor idoneidad) a 4 (mayor idoneidad) para su uso como agua para irrigación, según lo establecido por Şener, Varol y Şener (2021) (tabla 3), calculando el ICAI haciendo uso de la ecuación 5, que contempla los pesos relativos del peligro por salinidad (PS), por infiltración y permeabilidad (IP), por toxicidad específica del ion (TEI) y por efectos misceláneos (EM) multiplicados por la suma producto de cada uno de los pesos relativos por criterio (Cw_i) y subcriterios (SCw_i).

$$ICA I = [PS_{w_i} \times (PS_{1C_{w_i}} \times PS_{1SC_{w_i}} + PS_{2C_{w_i}} \times PS_{2SC_{w_i}})] + [IP_{w_i} \times (IP_{1C_{w_i}} \times IP_{1SC_{w_i}})] + [TEI_{w_i} \times (TEI_{1C_{w_i}} \times TEI_{1SC_{w_i}} + TEI_{2C_{w_i}} \times TEI_{2SC_{w_i}} + TEI_{3C_{w_i}} \times TEI_{3SC_{w_i}} + TEI_{4C_{w_i}} \times TEI_{4SC_{w_i}})] + [EM_{w_i} \times (EM_{1C_{w_i}} \times EM_{1SC_{w_i}} + EM_{2C_{w_i}} \times EM_{2SC_{w_i}} + EM_{3C_{w_i}} \times EM_{3SC_{w_i}})]$$

Ecuación 5

Tabla 3. Clasificación de los criterios de calidad del agua de riego y pesos asignados de todos los criterios

Peligro	Peso (w_i)	Criterio	Peso (C_{w_i})	Criterio	Subcriterio	Peso (SC_{w_i})			
Salinidad (PS)	4	ECw	3		< 700	4			
					700 - 2000	3			
					2000 - 3000	2			
					> 3000	1			
					< 450	3			
					450 - 2000	2			
Infiltración y Permeabilidad (IP)	3	RAS: 0-3	3	y ECw	> 2000	1			
					> 700	3			
					700-200	2			
					< 200	1			
					> 1200	3			
					1200 - 300	2			
		RAS: 3-6	2		< 300	1			
					> 1900	3			
					1900 - 500	2			
					< 500	1			
					< 3	3			
					3 - 9	2			
Toxicidad específica del ion (TEI)	2	Cl	2		> 9	1			
					< 140	3			
					140 - 350	2			
					> 350	1			
					< 5,0	3			
		Fe	1		> 5,0	1			
					< 0,2	3			
					> 0,2	1			
		Efectos misceláneos (EF)	1		NO3	3		< 5,0	3
								5,0-30,0	2
> 30,0	1								
< 90	3								
90-500	2								
HCO3	2			> 500	1				
				6,5-8,4	3				
				< 6,5 y > 8,4	1				
				pH	1				

Fuente: Ayers y Westcot (1985); Şener, Varol y Şener (2021)



Resultados

Análisis estadístico de las propiedades hidrogeoquímicas

Los análisis estadísticos de las matrices de datos asociadas a los dos periodos de muestreo, entre estos la media (M), desviación estándar (DS), mediana (Me), valores máximos (Máx) y mínimos (Mín), se presentan en la tabla 2. Los estadísticos y respectivos valores del test T (T) y test de Wilcoxon-Mann-Whitney (U) se presentan en la tabla 4.

Análisis de componentes principales y de conglomerado jerárquico

Previo al ACP se determinó que los datos presentan una diferencia estadísticamente significativa (Bartlett's K-squared = 7189,8, df = 33, p-value < 0,001); asimismo, la proporción de variación en los datos analizados puede ser causada moderadamente por factores subyacentes (KMO = 0,5). Por ello, la aplicación de un ACP genera una reducción significativa de la dimensionalidad de los datos originales (IBM Knowledge Center, 2018).

Tabla 4. Resultados de los test estadísticos (T/U) asociados a las variables hidrogeoquímicas para los dos periodos de muestreo

Var.	T/U	p	IC	Var.	T/U	p	IC
pH	2,53 ^T	0,022	-0,07 1,07	SO ₄	141,00 ^U	0,014	0,22 3,425
ECw	2,33 ^T	0,032	-8,78 80,99	Cl	51,00 ^U	0,950	-1,80 6,55
SDT	0,08 ^T	0,941	-25,16 26,49	NO ₂	2,00 ^U	0,789	-0,29 0,062
Na	74,00 ^U	0,640	-3,66 1,49	NO ₃	23,00 ^U	1,000	-0,45 0,40
Ca	-2,03 ^T	0,059	-4,54 0,80	Col. F	47,00 ^U	0,170	-990,00 33,00
Mg	-1,07 ^T	0,301	-3,90 1,80	Col. T	78,00 ^U	0,766	-3295,00 9550,50
Fe	104,00 ^U	0,201	-0,08 1,00	E. coli	86,00 ^U	0,366	-131,50 243,45
Mn	25,00 ^U	0,813	-0,88 1,48	SAR	84,00 ^U	0,966	-0,08 0,06
HCO ₃	-0,72 ^T	0,480	-18,82 11,31				

Var: Variable; T: test T; U: test de Wilcoxon-Mann-Whitney; IC: intervalo de confianza; p: valor p

Tabla 5. Contribuciones en cada eje del ACP en modo-R de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados para los dos periodos de muestreo

Variable	Componente 1		Componente 2		Componente 3		Componente 4	
	ENE	OCT	ENE	OCT	ENE	OCT	ENE	OCT
pH	0,77	0,09	0,83	0,92	12,60	11,22	1,13	2,16
ECw	6,42	6,39	0,22	1,07	0,15	0,58	0,15	0,13
TDS	6,92	6,36	0,03	0,42	0,00	0,44	0,13	0,03
Na	3,86	3,86	2,70	4,37	3,60	0,11	0,60	1,93
Ca	5,58	5,54	0,57	0,15	2,47	4,61	0,00	0,26
Mg	5,39	6,08	0,51	0,18	0,00	0,54	4,13	1,18
Fe	0,04	0,00	3,52	3,86	0,60	2,50	7,40	17,49
Mn	2,29	5,06	9,11	0,02	2,84	4,12	1,13	0,97
HCO ₃	5,97	5,44	1,04	2,02	2,70	2,10	0,00	0,71
SO ₄	1,95	0,06	5,50	6,49	1,87	1,03	0,21	6,98
Cl	2,80	3,07	4,00	5,23	4,94	2,31	1,83	1,23
NO ₂	0,11	0,01	0,58	3,44	0,09	1,88	0,12	16,21
NO ₃	1,32	0,76	0,08	2,04	19,05	7,34	0,13	0,15
Col. F	1,00	2,16	6,11	9,12	0,38	0,03	7,04	4,48
Col. T	0,08	1,36	0,35	12,95	0,44	0,01	0,79	0,54
E. coli	0,89	3,32	4,89	0,01	0,65	0,29	7,82	9,55
SAR	2,71	2,35	2,99	4,66	6,70	1,82	0,97	2,44
Eigenvalue	13,80		4,75		3,59		3,34	
% varianza	40,60		14,00		10,60		9,80	
% var acum	40,60		54,60		65,20		75,00	

*Números en negrita representan las variables con mayores contribuciones en cada componente

Las variables pH, T, STD, HCO₃, Cl, NO₃, NO₂, SO₄, Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Col. F, Col. T, *E. coli* y SAR fueron usadas en el ACP. Empleando el criterio de Kaiser (1960) y la representación gráfica de las componentes y teniendo en cuenta las variables con mayores contribuciones a los ejes (eigenvalues >1; contribuciones >5), se determinaron cuatro componentes para interpretar estadísticamente los principales procesos que controlan el comportamiento hidroquímico y la calidad de las muestras del agua subterránea (figura 2 y tabla 5), los cuales representan el 75,0 % de la varianza total del ACP en modo R.

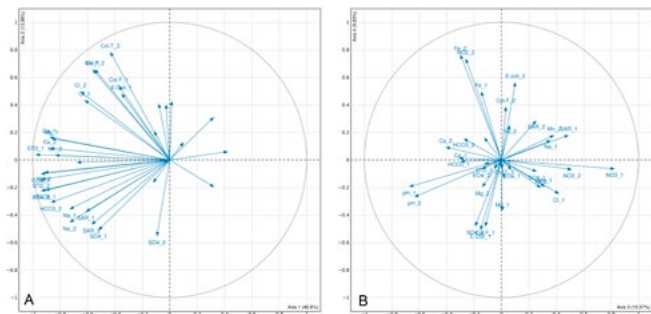


Figura 2. Diagrama de dispersión en modo-R de las contribuciones a los ejes A) 1 y 2; B) 3 y 4.

En adición, el resultado del ACJ en modo Q para 18 muestras de agua subterránea en dos periodos de muestreo se presenta en la figura 3. Se obtuvieron tres conglomerados ACJ-1, ACJ-2 y ACJ-3 que representan diferentes características de calidad.

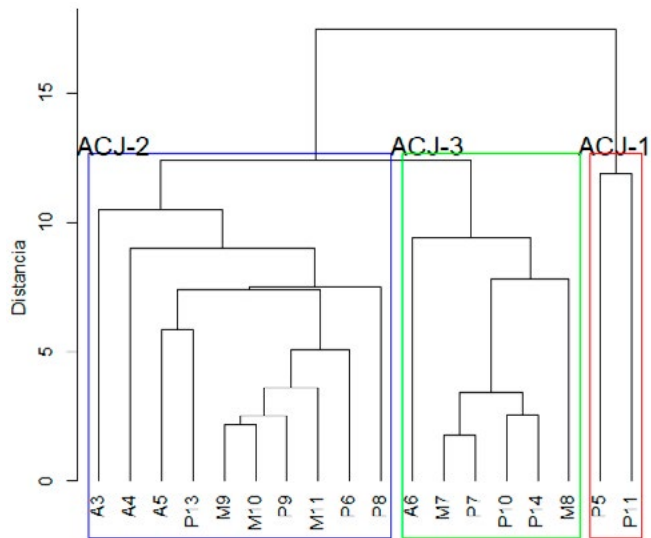


Figura 3. Conglomerados asociados al dendrograma de las muestras de agua subterránea.

Evaluación del agua subterránea para uso doméstico y consumo humano usando el ICA

Los pesos relativos asociados al ICA fueron asignados a los parámetros fisicoquímicos utilizados (tabla 2)

teniendo en cuenta su importancia para el agua potable y los potenciales efectos a la salud que esta puede generar (Abbasi y Abbasi, 2012), acorde con los estándares de calidad para su uso establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017) y el Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007). Por tal razón para el presente estudio, el peso máximo (5) fue asignado a los parámetros SDT, NO₂, NO₃, Col. T, Col. F y *E. coli*, debido que estos pueden afectar la aceptabilidad del usuario para su consumo, generar efectos sobre población sensible o ser potenciales indicadores de contaminación orgánica de origen antrópico (OMS, 2017). El peso relativo mínimo (1) fue asignado al HCO₃, en vista de su baja incidencia sobre la salud humana. Al pH, ECw, Mn, SO₄, Cl le fue asignado un peso de 4. Al Na, Ca, Fe un peso de 3 y al Mg un peso de 2 (tabla 2).

Tabla 6. Valores de ICA y sus tipos para cada muestra en el área de estudio

ID	ICA ENE	ICA OCT	ID	ICA ENE	ICA OCT
A3	2,32 × 10 ⁵	1,10 × 10 ⁶	P5	4,60 × 10 ⁵	3,03 × 10 ⁶
A4	1,49 × 10 ⁴	8,20 × 10 ³	P6	1,25 × 10 ⁵	1,22 × 10 ⁶
A5	1,96 × 10 ⁴	2,27 × 10 ⁵	P7	1,20 × 10 ⁵	7,46 × 10 ⁴
A6	2,99 × 10 ⁴	2,77 × 10 ⁵	P8	2,23 × 10 ⁶	1,01 × 10 ⁶
M7	1,31 × 10 ⁵	1,89 × 10 ⁵	P9	2,83 × 10 ⁶	3,72 × 10 ⁵
M8	1,29 × 10 ⁷	1,31 × 10 ⁶	P10	15,50	1,62 × 10 ⁵
M9	1,94 × 10 ⁶	4,02 × 10 ⁵	P11	2,60 × 10 ⁵	8,23 × 10 ⁵
M10	7,46 × 10 ⁵	6,12 × 10 ⁵	P14	8,90 × 10 ³	3,27 × 10 ⁵
M11	1,71 × 10 ³	1,05 × 10 ⁴	P13	1,88 × 10 ⁵	5,12 × 10 ³
P4	4,62 × 10 ⁴				

Rango	Tipo de agua
< 50	Agua de excelente calidad para consumo (EC), muy cerca de condiciones prístinas.
50,1-100	Agua de buena calidad para consumo (BC). Presenta leve contaminación, pero es de muy buena calidad para beber.
100,1-200	Agua de pobre calidad (PC). Hay incidencias menores de deterioro en la calidad.
200,1-300	Agua de muy pobre calidad (MPC). Existen problemas obvios de contaminación.
>300,1	Agua invariable para consumo (InC). Presenta una mala calidad para consumo.

Evaluación del agua subterránea y de precipitación para irrigación usando el ICAI

Acorde con los criterios de calidad establecidos por Ayers y Westcot (1985), se asignaron los pesos relativos a cada variable fisicoquímica a evaluar en el ICAI, según lo referenciado en la tabla 3. Los pesos relativos para cada uno de los peligros del agua de irrigación se establecieron en el rango de 4 (máximo) a 1 (mínimo), dado el efecto por potencial salinización del suelo que puede ocasionar



pérdida de productividad ($w_{ip_s} = 4$), pérdida de estructura de suelo, del complejo de intercambio, así como posible acidificación ($w_{ip} = 3$), altas concentraciones de constituyentes del suelo que se pueden acumular en las plantas y causar daños o reducción en la productividad del cultivo ($w_{itei} = 2$), u otros problemas asociados a una excesiva concentración de nutrientes que pueden causar excesivo crecimiento de vegetación, retrasos en la maduración del cultivo, problemas de corrosión o incrustación en maquinaria, entre otros ($w_{iem} = 1$).

El ICAI fue evaluado para dos clases de agua para irrigación, idoneidad alta (171-132) e idoneidad baja (131-53). Si el valor del ICAI es mayor a 132, indica que el agua no presenta o presenta restricciones bajas para ser usada para la irrigación en suelos preferiblemente de textura orgánica, con buena a media permeabilidad o suelos arenosos orgánicos, no recomendadas para suelos con texturas finas (arcillosas o limosas) o para cultivos sensibles al aumento de salinidad del suelo (Wilcox, 1955; Mukate *et al.*, 2019; Muniz *et al.*, 2020); por otro lado, valores de ICAI menores de 132 indican aguas con alta a severa restricción para ser usadas para la irrigación en condiciones normales. Pueden ser empleadas en suelos con alta permeabilidad sin capas compactadas o para cultivos con moderada a alta tolerancia a sales, a excepción de agua con valores extremadamente bajos de Na, Cl y HCO_3 (Şener, Varol y Şener, 2021).

Tabla 7. Valores de ICAI y sus tipos para cada muestra en el área de estudio

ID	ICAI ENE	ICAI OCT	ID	ICAI ENE	ICAI OCT
A3	150	141	P5	142	144
A4	144	144	P6	144	148
A5	144	142	P7	153	147
A6	145	145	P8	148	148
M7	147	147	P9	148	152
M8	144	148	P10	153	143
M9	154	152	P11	144	142
M10	154	152	P14	160	145
M11	148	152	P13	160	148
P4	151	151			

Discusión

Se estableció que en los dos periodos de muestreo las variables pH, ECw, SDT, Ca, Mg y HCO_3 presentaban una distribución normal ($p > 0,01$) y las variables restantes se comportaban como una distribución no normal ($p < 0,01$); asimismo, que la totalidad de muestras son homocedásticas ($p < 0,01$). Tras la aplicación del test T o del test de Wilcoxon-Mann-Whitney según la distribución de las variables (tabla 4), se determinó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de agua en los periodos seco y lluvioso ($p > 0,01$);

por lo tanto, se evidencia la inexistencia un efecto significativo de los periodos hidrometeorológicos sobre el comportamiento hidrogeoquímico del agua subterránea analizada en la CRP.

Respecto al ACP, teniendo en cuenta las contribuciones de cada eje en modo-R de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados (tabla 5), se establece que el componente 1, que explica el 40,6 % del total de la varianza y es caracterizado por mayores contribuciones de las variables ECw, SDT, Ca, Mg y HCO_3 , representa la evolución hidrogeoquímica natural del agua subterránea por fenómenos de meteorización y disolución de rocas que provocan un aumento de la concentración de estas variables a través de su tránsito por el acuífero (Ayers y Westcot, 1985; Güler *et al.*, 2002; López Velandia, 2018). El componente 2, que explica el 14,0 % del total de la varianza, asociado con las variables SO_4 , Col. F para los dos periodos de muestreo, Mn (ENE) y Cl y Col. T (OCT), representa la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea, dado el tránsito de esta por la zona saturada, así como a los efectos de la polución asociada a la interacción del agua subterránea con vertimientos crudos que presentan carga microbiológica de origen antropogénico (Lesser-Carrillo *et al.*, 2011; Correa Basto, 2020), exacerbada en los meses de exceso hídrico. El componente 3 explica el 10,6 % del total de la varianza, relacionado con las variables pH, NO_3 (ENE y OCT) y SAR (ENE), asociadas a actividades agrícolas tales como riego (en épocas de déficit hídrico) y la potencial infiltración de los nutrientes o abonos químicos usados en la agricultura (Seiler *et al.*, 2001; Vence Márquez *et al.*, 2012), los cuales fueron vertidos sobre los cultivos presentes en la CRP. Por último, el componente 4 explica el 9,8 % del total de la varianza, coligado con las variables Fe, *E. coli* (ENE y OCT), Col. F (ENE) y SO_4 y NO_2 (OCT), relacionada con polución de origen antropogénico de carácter microbiológico en medios reductores, particularmente para octubre. El ACP refleja que las propiedades hidrogeoquímicas del agua subterránea en el área de estudio está influenciada por las interacciones agua-roca, así como por la interacción con actividades antrópicas que causan detrimento de la calidad del recurso hídrico.

Adicionalmente, según los resultados obtenidos en el ACJ, el conglomerado ACJ-1 reúne el 11,1 % de los puntos de muestreo ($n = 2$) que presentan las mayores concentraciones promedio de las variables fisicoquímicas analizadas, particularmente ECw, STD, HCO_3 , Cl, Ca, Mg, Mn, Col. F, *E. coli* y SAR, ubicadas en los extremos NE y NW de la CRP; este es el conglomerado más expuesto a la contaminación antropogénica de carácter microbiológico. El ACJ-2 y ACJ-3 presentan distancias de unión similares; por tanto, mayor similitud hidrogeoquímica. El ACJ-2 congrega el 55,6 % de los puntos de muestreo ($n = 10$) ubicados a lo largo de la CRP, que muestran concentraciones medias en comparación con las representadas por los clústers ACJ-1 y ACJ-3, con evidencia de polución por actividades

antrópicas al registrar las mayores concentraciones promedio de NO_3 y Col. T, en contraste con el ACJ-3, que agrupa el 33,3 % de los puntos de muestreo ($n = 6$), los cuales reúnen las menores concentraciones promedio de las variables fisicoquímicas analizadas para los dos periodos de muestreo, particularmente ECw, T, STD, HCO_3 , SO_4 , Cl, NO_2 , Ca, Mg, Mn, Col. F, *E. coli* y SAR; se ubican en el límite S - SE del acuífero del valle del río Pavas.

Al analizar los valores determinados para el ICA presentados en la tabla 6, los cuales oscilan en un rango de $1,55 \times 10^1$ a $1,29 \times 10^7$, se determina que la muestra de agua subterránea P10 del periodo de muestreo de enero se encuentra en la categoría excelente (EC). El restante de muestras de agua subterránea para los dos periodos de muestreo se ubican en la categoría inviable para consumo directo por el ser humano (InC). Según la Resolución 2115 de 2017, por la cual se señalan los estándares para la evaluación de la calidad del agua para consumo humano (Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007), la totalidad de muestras de agua subterránea para los dos periodos de muestreo sobrepasan alguno de los valores máximos aceptables para las variables químicas Fe, Mn y microbiológicas Col. T, Col. F y *E. coli* (tabla 2). Por lo anterior se considera que el agua extraída de la CRP no es apta para consumo humano, y requiere tratamiento previo para garantizar su potabilización y suministro a los pobladores de la región (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2021).

Frente al ICAI presentados en la tabla 7, que fluctúan entre 141 y 160, se estableció que la totalidad de las muestras de agua subterránea analizada en los dos periodos de muestreo se encuentran en la categoría «Idoneidad alta», y pueden ser usadas sin ninguna restricción (RAS: 0,00 - 1,16) con fines de uso agrícola (Khmila *et al.*, 2021). Sin embargo, teniendo en cuenta el Decreto 1584 de 1984, y en particular el artículo 40, por el cual se establecen los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para uso agrícola, el agua subterránea para riego debe ser usada con precaución (tabla 2), particularmente en los puntos de muestreo A3, A4, A5, M8, P5 y P11, debido a que superan el límite máximo permitido en manganeso, lo que puede provocar efectos tóxicos sobre los cultivos (El-Jaoual y Cox, 2008). Lo mismo ocurre con los puntos A3, M8, M9, M10, P5, P6, P8, P9, P11 en caso que su uso sea destinado al riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto (Presidencia de la República de Colombia, 1984), ya que superan los valores máximos aceptables desde el punto de vista microbiológico (Col. T > 5000 NMP/100 mL; Col. F > 1000 NMP/100 mL), y pueden provocar efectos a la salud del consumidor por ingesta de estos alimentos (Rock y Rivera, 2014; OMS, 2017).

Conclusiones

Se evidencia que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre las muestras de agua en los periodos seco y lluvioso ($p > 0,01$); por lo tanto, no se exhibe un efecto de los periodos hidrometeorológicos sobre el comportamiento hidrogeoquímico del agua subterránea analizada en la CRP.

Adicionalmente, se observó la existencia de factores naturales y antrópicos que alteran la hidrogeoquímica del agua subterránea. Entre los factores naturales se encuentran la meteorización y disolución de rocas en las que el agua subterránea se almacena y transporta: como factores antrópicos se evidencia interacción con vertimientos de origen agrícola o doméstico, que en su composición presentan sustancias asociadas a nutrientes (NO_3 , NO_2) o especies indicadoras de contaminación microbiológica del agua (coliformes fecales, *Escherichia coli*). Como áreas con mayor exposición a la contaminación antropogénica de carácter microbiológico, se aglomeraron los puntos P5 y P11, ubicados en los extremos NE y NW de la CRP; disminuyeron levemente la exposición a los efectos antrópicos de las actividades que se desarrollan en la CRP en dirección al límite S - SE del acuífero del valle del río Pavas, donde se encuentran los puntos de muestreo P13, A3, A4.

Basándose en el ICA y en los criterios colombianos de calidad del agua para consumo humano, la totalidad de muestras de agua subterránea analizadas se ubican en la categoría inviable para consumo directo por el ser humano y requiere tratamiento previo para garantizar su potabilización y suministro a los pobladores de la región. Respecto a su uso para irrigación, el agua subterránea se encuentra en la categoría «Sin o bajas restricciones», por lo cual esta puede ser usada en suelos con alta permeabilidad sin capas compactadas o para cultivos con moderada a alta tolerancia a sales. Sin embargo, debe usarse con precaución particularmente los puntos A3, A4, A5, M8, P5 y P11, al superar el límite máximo permitido en manganeso, que puede provocar efectos tóxicos sobre los cultivos, y los puntos A3, M8, M9, M10, P5, P6, P8, P9, P11, en caso de que su uso sea destinado al riego de frutas y hortalizas de tallo corto, debido que presentan coliformes totales y coliformes fecales, que potencialmente pueden generar efectos a la salud del consumidor por ingesta de estos alimentos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se evidencia la necesaria gestión de las autoridades locales, entre las que se plantean la toma de decisiones frente al uso prioritario del agua subterránea, lo que favorece la investigación detallada sobre las características hidrogeoquímicas del agua subterránea en la CRP y la necesaria toma de medidas que propendan por la reducción y potencial eliminación de las fuentes de polución que amenazan la calidad del agua subterránea, particularmente las microbiológicas.



Agradecimientos

Este artículo de investigación hace uso de los datos hidrogeoquímicos utilizados para el estudio de impacto ambiental asociado al corredor vial Mulaló-Loboguerrero (Resolución N.º 1429 del 17 de agosto de 2021), y que fue presentado a la Agencia Nacional de Licencias Ambientales. El autor agradece el apoyo del personal de los laboratorios y de la empresa consultora que realizó la recolección y el análisis fisicoquímico y microbiológico de las muestras de agua subterránea, cuyos datos sirvieron como valioso insumo para el análisis de las condiciones de calidad del

agua subterránea del área de estudio. Adicionalmente, agradece al editor y los revisores anónimos, cuyos comentarios ayudaron a mejorar significativamente el presente documento.

Contribución de autoría

El autor desarrolló la totalidad del procesamiento de datos, el análisis de resultados y la redacción del artículo.

Conflictos de interés

El autor declara no tener conflicto de interés.

Referencias bibliográficas

- Abbasi, T. y Abbasi, S. (2012).** *Water quality indices*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-69472-7>
- Alcaldía de La Cumbre. (2020).** *Plan de desarrollo municipal 2020-2023. «La Cumbre somos todos»*. Disponible en: [https://ogpt.valledelcauca.gov.co/storage/Cientes/ogpt/principal/imagenes/contenidos/2445-pdm la cumbre.pdf](https://ogpt.valledelcauca.gov.co/storage/Cientes/ogpt/principal/imagenes/contenidos/2445-pdm%20la%20cumbre.pdf)
- Asare, A., Appiah-Adjei, E., Ali, B. y Owusu-Nimo, F. (2021).** «Physico-chemical evaluation of groundwater along the coast of the Central Region, Ghana». *Groundwater for Sustainable Development*, 13(January 2020), p. 100571. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100571>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2021).** Resolución N.º 01429. Colombia.
- Ayers, R. S. y Westcot, D. W. (1985).** «Water quality for agriculture. FAO irrigation and drainage paper». Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Abdelkader-Bouaziz/post/I_am_looking_for_a_research_paper/attachment/5e934607f155db0001f47f0a/AS%3A879539731316736%401586710021848/download/Water+Quality+for+Agriculture.pdf
- Correa Basto, O. (2020).** *Modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca del río pavas en la zona de influencia del proyecto vial Mulaló-Loboguerrero en el municipio de La Cumbre - Valle del Cauca*. Tesis en Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Antonio Nariño. Disponible en: <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2179>
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (1983).** *Hidrología subterránea*. Tomo I. (2.ª ed.). Barcelona: Ediciones Omega.
- Davis, J. C. (2002).** *Statistics and data analysis in geology*. (3.ª ed.). Kansas: John Wiley & Sons.
- Dray, S. y Thioulouse, J. (2020).** «Analysis of ecological data: Exploratory and Euclidean methods in environmental sciences». Disponible en: <http://pbil.univ-lyon1.fr/ADE-4/>
- El-Jaoual, T. y Cox, D. A. (2008).** «Manganese toxicity in plants». *Journal of Plant Nutrition*, 21(2), pp. 353-386. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/01904169809365409>
- Elumalai, V., Brindha, K., Sithole, B. y Lakshmanan, E. (2017).** «Spatial interpolation methods and geostatistics for mapping groundwater contamination in a coastal area». *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), pp. 11601-11617. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8681-6>
- Galeano Loaiza, J., Bulding, M. V. y Arango, A. F. (2000).** *Esquema de ordenamiento territorial del Municipio de La Cumbre - Valle del Cauca*. Disponible en: <https://repositorioicdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/11219/6301-2.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- González, J. D., Arboleda, C. A. y Botero, S. (2015).** «Social infrastructure development: The Case for private participation in potable water supply in Colombia». *PM World Journal*, IV(10), pp. 1-15. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/277955149_Social_Infrastructure_Development_The_Case_for_Private_Participation_in_Potable_Water_Supply_in_Colombia
- Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E. y Turner, K. A. (2002).** «Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data». *Hydrogeology Journal*, 10(4), pp. 455-474. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0196-6>
- Hothorn, T., Winell, H., Hornik, K., van de Wiel, M. y Zeileis, A. (2021).** «Conditional inference procedures in a permutation test framework». Disponible en: <http://coin.r-forge.r-project.org>
- IBM Knowledge Center. (2018).** «KMO and Bartlett's Test». Disponible en: <https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/28.0.0?topic=dection-kmo-bartletts-test>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2007).** *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua*. (1.ª ed.). Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021172/Protocoloparaelmonitoreoyseguimientodelagua.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2013).** *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua*. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022653/DocumentoMARCOCONCEPTUAL.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2015).** *Mapa de cobertura de la Tierra. Adaptación Corine Land Cover. Escala 1:100.000. Periodo 2010-2012*. Disponible en: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-76.72593182729393,3.5648638999446645,-76.37711590932565,3.758445174465464,4686&b=igac&l=880&u=76377&t=32&servicio=880>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2019).** *Estudio Nacional del Agua 2018, Marzo de 2019*. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA_2018.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2022).** *Análisis físicoquímicos de aguas, metodologías de análisis*. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/metodos-analiticos>
- Instituto Geológico y Minero de España, IGME. (1985).** *Composición química de las aguas subterráneas naturales*. Disponible en: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf
- Jean-Eudes, O. K., Avahounlin, R., Kéломé, C., Pierre, O., Adeké, A. y Vissin, E. (2022).** «Evaluation of the physico-chemical quality and potability of groundwater consumption in Department of Collines at Benin». *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10(01), pp. 29-48. Disponible en: <https://doi.org/10.4236/gep.2022.101003>
- Kaiser, H. F. (1960).** «The application of electronic computers to factor analysis». *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), pp. 141-151. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Khmila, K., Trabelsi, R., Zouari, K. y Kumar, U. S. (2021).** «Application of geochemical and isotopic tracers for the evaluation of groundwater quality in the irrigated area of the Siba plain (Central West Tunisia)». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 313(April 2020), p. 107298. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107298>
- Krishna Kumar, S., Bharani, R., Magesh, N. S., Godson, P. S. y Chandrasekar, N. (2014).** «Hydrogeochemistry and groundwater quality appraisal of part of south Chennai coastal aquifers, Tamil Nadu, India using WQI and fuzzy logic method». *Applied Water Science*, 4(4), pp. 341-350. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0148-4>
- Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. (2022).** «Diagrammes». Disponible en: <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>
- Lesser-Carrillo, L. E., Lesser-Illades, J., Arellano-Islas, S. y González-Posadas, D. (2011).** «Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del valle del Mezquital, México Central». *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3), pp. 323-336.
- López Velandia, C. C. (2018).** «Análisis de las características físicoquímicas del agua subterránea de la cuenca del río chicú, Colombia, usando indicadores hidroquímicos y estadística multivariante». *Ingeniería y Ciencia*, 14(28), pp. 35-68. Disponible en: <https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.28.2>
- López Velandia, C. C. (2023).** «Evaluación hidrogeoquímica e isotópica de la calidad del agua subterránea en el acuífero aluvial del valle del Río Pavas, Colombia». *Revista EIA*, 20(39), pp. 1-25. Disponible en: <https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1602>



- Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007).** «Resolución 2115». *Diario Oficial*, (46679), p. 23. Disponible en: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=30008>
- Mukate, S., Wagh, V., Panaskar, D., Jacobs, J. y Sawant, A. (2019).** «Development of new integrated water quality index (IWQI) model to evaluate the drinking suitability of water». *Ecological Indicators*, 101(January), pp. 348-354. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.034>
- Muniz, D., Malaquias, J., Lima, J. y Oliveira-Filho, E. (2020).** «Proposal of an irrigation water quality index (IWQI) for regional use in the Federal District, Brazil». *Environ Monit Assess*, 192(607), pp. 1-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08573-y>
- Naranjo Henao, J. L. (2020).** «Modelo geológico detallado del acuífero del valle del río Pava». Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08573-y>
- Organización de las Naciones Unidas, ONU. (2022).** Objetivo 6: «Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos». Objetivos de Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Organización Mundial de la Salud, OMS. (2017).** *Guidelines for drinking-water quality*. (4.ª ed.). Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
- Pardo, C. E., Campo, P. C. del y Torres, C. J. (2018).** «Combination of factorial methods and cluster analysis». *Revista Colombiana de Estadística*, 30(2), pp. 231-245.
- Portilla Gamboa, M. (Dir.). (2015).** *Memoria explicativa mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100.000 plancha 279-dagua memoria explicativa mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa*. Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B8/21003010028449/Documento/Pdf/2105284491101000.pdf>
- Presidencia de la República de Colombia. (1984).** «Decreto 1594 de 1984». *Diario Oficial*, (36700). Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18617>
- Puertas Orozco, O. L., Carvajal Escobar, Y. y Quintero Angel, M. (2011).** «Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia». *DYNA (Colombia)*, 78(169), pp. 112-120.
- R Core Team. (2015).** «R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing». Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74686-7>
- Revelle, W. (2010).** *Procedures for personality and psychological research*. [Computer software manual] Evanston: Northwestern University. Disponible en: <http://www.personality-project.org/r/psych-manual.pdf>
- Rice, E., Baird, R., Eaton, A. y Clesceri, L. (2012).** *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation.
- Rock, C. y Rivera, B. (2014)** «La calidad del agua, *E. coli* y su salud». *The University of Arizona - College of Agriculture and Life Sciences - Cooperative Extension*, (March), pp. 1-5. Disponible en: <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1624s.pdf>
- Seiler, K.-P., Müller, E., Decarli, F., Alvarado Rivas, J., Alvarado Rivas, J. y Sajjad, I. (2001).** «Sección V: Impacto antrópico sobre los sistemas subterráneos». En W. G. Mook (ed.), *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y Aplicaciones*. (1.ª ed.). Vienna: UNESCO e IAEA. Disponible en: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_publication_hydroCycle_es.html
- Şener, Ş., Varol, S. y Şener, E. (2021).** «Evaluation of sustainable groundwater utilization using index methods (WQI and IWQI), multivariate analysis, and GIS: the case of Akşehir District (Konya/Turkey)». *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), pp. 47991-48010. doi: 10.1007/s11356-021-14106-y
- Vence Márquez, L., Rivera González, M., Osorio Bayter, Y. y Castillo Sarabia, A. (2012).** «Caracterización microbiológica y fisicoquímica de aguas subterráneas de los municipios de La Paz y San Diego, Cesar, Colombia». *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(2), p. 27. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/21456453.953>
- Wang, H., Yang, Q., Ma, H. y Liang, J. (2021).** «Chemical compositions evolution of groundwater and its pollution characterization due to agricultural activities in Yinchuan Plain, northwest China». *Environmental Research*, 200(June), p. 111449. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111449>
- Wilcox, L. V. (1955).** *Classification and use of irrigation waters*. Washington, D. C.: United States Department of Agriculture. Disponible en: https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=uKJS_1trwEC&oi=fnd&pg=PA1&ots=pA6wO_546P&sig=zdFNcdil9nK7sfNhzfAOSda-xw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Yidana, S. M., Banoeng-Yakubo, B. y Akabzaa, T. M. (2010)** «Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana». *Journal of African Earth Sciences*, 58(2), pp. 220-234. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.03.003>
- Yidana, S. M. y Yidana, A. (2009).** «Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis». *Environmental Earth Sciences*, 59(7), pp. 1461-1473. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0132-3>
- Zolekar, R. B., Todmal, R., Bhagat, V., Bhailume, S., Korade, M. y Das, S. (2021).** «Hydro-chemical characterization and geospatial analysis of groundwater for drinking and agricultural usage in Nashik district in Maharashtra, India». *Environment, Development and Sustainability*, 23(3), pp. 4433-4452. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00782-2>