

Exploración de las Características Hidroquímica del Agua Subterránea en la Zona Baja de la Cuenca Río Carrizal

Saldarriaga Lucas, Veris Antonio^{1*} ; Mecías Gallo, Freddy Wilberto¹ ; Cedeño Sacón, Ángel Frowen¹ ; Valdivieso López, Cristian Sergio¹ ; García Arteaga, Dilmo José¹ 

¹Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Carrera de Ingeniería Agrícola, Calceta, Manabí, Ecuador

Resumen: La falta del recurso hídrico en cantidad y calidad ha generado diferentes intereses en las instituciones, investigadores y científicos en estudiar los cuerpos de agua para el desarrollo humano. El objetivo de la investigación fue explorar las características hidroquímicas del agua subterránea en la cuenca baja del valle del río Carrizal mediante técnicas multivariantes y geoespaciales que permitan establecer la cantidad y calidad de este recurso en esta zona. El desarrollo del trabajo consistió en tomar muestras de agua subterránea de catorce pozos de observación, cada uno con distintos usos de suelo. Los parámetros que se evaluaron fueron: pH, conductividad eléctrica, dureza, sólidos totales disueltos, relación absorción sodio, y además de los cationes y aniones. De manera general, los parámetros hidroquímicos muestran que la variable dureza se encuentra en un nivel superior al permisible para su uso, mientras que: la conductividad, relación sodio, y el pH mostraron valores bajos sin problemas para su uso. El catión calcio (Ca^{2+}) representa 67 % y el ion Bicarbonato 75 % siendo las concentraciones mayoritarias de cationes y aniones, respectivamente. Profundizando más el análisis se pudo evidenciar la relación existente entre la dureza y el parámetro de conductividad, sólidos totales, calcio, ion bicarbonato, cloruro y sulfato. La calidad del agua subterránea del valle se encuentra determinada por la mineralización de la roca madre, esto se traduce en la concentración alta de dureza y su correlación con el calcio y los aniones bicarbonato, cloruro y sulfato. Las técnicas multivariantes y geoespaciales empleadas en la exploración permitieron conocer comportamientos del agua subterránea en el valle del río Carrizal.

Palabras clave: Recurso hídrico, aniones y cationes, parámetros hidroquímicos

Exploration of the Hydrochemical Characteristics of Groundwater in the Lower Zone of the Carrizal River Basin

Abstract: The lack of water resources, in quantity and quality, has generated different interests in institutions, researchers and scientists to study water bodies for human development. The objective of the research was to explore the hydrochemical characteristics of groundwater in the lower basin of the Carrizal river Valley using multivariate and geospatial techniques. The development of the work consisted of taking groundwater samples from sixteen observation wells, each with different land uses. The parameters evaluated were: pH, electrical conductivity, hardness, total dissolved solids, sodium absorption ratio, and also cations and anions. In general, the hydrochemical parameters show that the hardness variable is at a higher level than that permissible for its use, while: conductivity, sodium ratio, and pH showed low values without problems for its use. The calcium cation (Ca^{2+}) represents 67 % and the bicarbonate ion 75 %, with the majority concentrations being cations and anions, respectively. Further analysis revealed the relationship between hardness and the variables conductivity, total solids, calcium, bicarbonate ion, chloride and sulphate. The quality of the groundwater in the valley is determined by the mineralization of the bedrock, which translates into a high concentration of hardness and its correlation with calcium and the bicarbonate, chloride and sulphate anions. The multivariate and geospatial techniques used in the exploration allowed us to understand the behavior of groundwater in the Carrizal river valley.

Keywords: Water resource, anions and cations, hydrochemical parameters

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores desafíos para la población mundial radica en la necesidad de suministrar agua a las distintas demandas del ser humano. Para ello, es necesario garantizar en cantidad

y calidad este recurso. En el ámbito global, se reconoce que el acceso al agua es un derecho fundamental y representa un factor esencial en el desarrollo sostenible de la sociedad (Cerón et al., 2021). Si bien el agua cubre más del 70 % de la superficie del planeta, el 97.5 % de esta se encuentra en el

*veris.saldarriaga@espam.edu.ec
Recibido:31/01/2025
Aceptado: 23/04/2025
Publicado en línea el 31/05/2025

10.33333/rp.vol55n2.01
CC BY 4.0

océano, mientras que solo el 2.5 % es dulce, de la cual 80 % en los glaciares, 19 % en agua subterránea y apenas 1 % agua en la superficie (Fernández-Cirelli, 2012).

En términos globales el agua superficial ha sido por mucho tiempo la fuente de abastecimiento más importante. Sin embargo, en muchas zonas, esta ha sido reemplazada por aguas subterráneas como fuente primaria (Giordano & Villholth, 2007). Esto ha hecho que, a nivel mundial, el agua subterránea sea considerada un recurso en transición, lo que desde el siglo XX ha generado diferentes beneficios, así como el desencadenamiento de precedentes en el almacenamiento y contaminación. La calidad de este recurso puede verse afectada por procesos naturales como por actividades humanas, lo que lo convierte en un tema ampliamente estudiado. Entre los factores considerados en su evaluación destacan el cambio climático, las interacciones agua-roca, las características geológicas, las prácticas agrícolas y los residuos urbanos e industriales (Nagaraju et al., 2016).

La evaluación y monitoreo de la calidad de aguas subterráneas se han convertido en áreas de gran interés global durante la última década. Estos estudios buscan identificar los usos de consumo y disminuir los riesgos asociados por su uso (Cerón et al., 2021).

Para el entendimiento de la geoquímica del agua subterránea se utilizan diversas técnicas gráficas y estadísticas que facilitan la comprensión de los diferentes datos obtenidos de las muestras de agua. Por ejemplo, el empleo de gráficas como el diagrama de Piper o Stiff (Piper, 1944; Stiff, 1951), así como el análisis estadístico correlacional o multivariado, que permiten identificar variaciones espaciales y temporales (Chou et al., 2012; Giménez-Forcada et al., 2017; Malagón et al., 2021). Estos análisis facilitan la determinación de la calidad del agua, además del vínculo con el uso previsto del recurso hídrico. Asimismo, ayudan a demostrar si la calidad es aceptable o no para su explotación, pues esto se debe a la diversidad de materiales presentes en este recurso (Schroeder, 2003).

Las técnicas de estadísticas multivariadas son esenciales para comprender el estado actual de las aguas subterráneas, así como identificar patrones complejos entre múltiples variables y sus relaciones subyacentes (Weerasinghe et al., 2024). Otras ventajas de estas técnicas en comparación con los análisis clásicos son: la identificación de lugares contaminados, patrones espaciales y temporales y la interacción de los diferentes contaminantes y sus fuentes, proporcionando una visión ampliada de los parámetros de calidad (Belkhiry et al., 2011; Gadelha et al., 2023).

Existen limitantes para obtener información fiable de aguas subterráneas, ya que suele ser costoso y laborioso y en ocasiones no es posible recolectar muestras (Zaresefat et al., 2024). Por lo cual, las geociencias emplean SIG y análisis geoestadísticos que pueden predecir valores en sitios no muestreados. Los métodos de interpolación han destacado por su capacidad para calcular valores en lugares no muestreados, bajo enfoques deterministas y geoestadísticos. Sin embargo, no hay evidencia que determine que alguno de estos métodos sea aceptado para todos los estudios de calidad de aguas subterráneas. Por ejemplo, Varouchakis & Hristopulos (2013)

hace comparación entre los métodos Kriging Ordinario (KO), Kriging Universal (KU), Kriging con triangulación Delaunay (DK) y Distancia Ponderada Inversa (IDW), curvatura mínima (CM), donde mencionan que ningún modelo es superior a otro, sin embargo destaca KO y KU, por otro lado, DK y el IDW tienen iguales rendimientos. En otro caso, Tayyab et al. (2023) reportan que el método IDW muestra mejores resultados con una densidad baja de puntos. Así también los modelos de interpolación EBK, KO y IDW han sido reportados como los mejores estimadores para los parámetros como pH, TDS, sulfato, nitrato, níquel, dureza, hierro y arsénico (Amah & Agu, 2020).

En el valle del río Carrizal, se desarrollan diversas actividades de tipos rurales y urbanas que involucran el uso directo o indirecto en el consumo del agua. Entre estas actividades se incluyen la ganadería, agricultura, acuicultura, uso doméstico, industrial, comercial y turístico. Ante todos estos antecedentes expuestos y las condiciones del entorno del Carrizal, el objetivo de esta investigación fue analizar la calidad del agua subterránea en la cuenca baja del valle del río Carrizal, mediante el empleo de estadísticas multivariada y la estimación espacial del recurso hídrico empleando métodos de interpolación.

2. METODOLOGÍA

2.1 Ubicación

La presente investigación fue de carácter exploratorio-descriptivo, desarrollada durante el final de la época lluviosa de 2017, en el mes de mayo, en la localidad de Limón, cantón Bolívar, provincia de Manabí, ubicada en las coordenadas: 00°49'27.9" de Latitud Sur y 80°10'47.2" de Longitud Oeste y una altitud de 15 m.s.n.m, perteneciente a la subcuenca del río Carrizal (Figura 1). Las condiciones generales del sitio incluyen una temperatura media ambiental de 27 °C, una humedad relativa de 82.29 %, y una precipitación media anual de 889.6 mm.

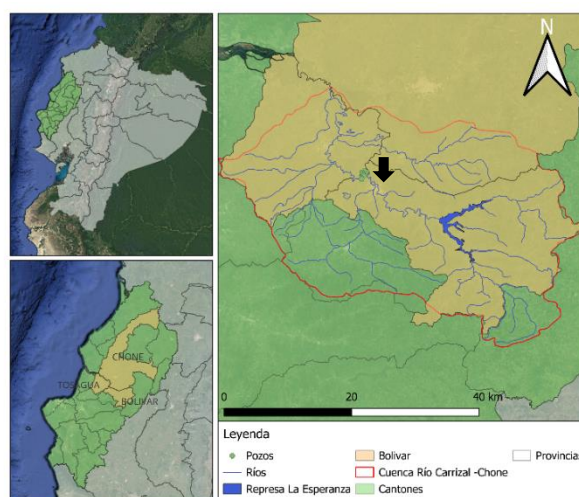


Figura 1. Ubicación de sitio Limón dentro de la subcuenca del río Carrizal

2.2 Distribución espacial de la red de monitoreo

Para la exploración de las características hidroquímica del agua subterránea, se realizó una red de pozos de monitoreo.

Esta red consistió en 14 puntos (pozos de observación), distribuyendo aproximadamente un pozo por cada 10 ha, bajo la recomendación de Vélez & Betnacur (2005) para el monitoreo de agua subterránea. Los pozos de muestreo tuvieron una profundidad de 9 m desde el nivel del suelo. Para su establecimiento se consideró accesibilidad, así también el uso del suelo, ubicándolos en zonas de cultivos (cacao, café, bosque, cultivos transitorios y potreros) y zonas de construcción (edificaciones). Además, se evitó ubicar cerca de zonas como canales, caminos o descargas de aguas negras que pudieran tener una influencia adicional sobre las muestras.

2.3 Muestreo y manejo de la muestra

El muestreo se realizó en una sola época del año, a finales del invierno, para lo cual se siguió las consideraciones de Market-Andrea (2016) durante la tomas de muestras. Estas consideraciones se basan en: 1) Purga del pozo (esta se realizó con la ayuda de una bomba volumétrica), 2) Medición de los parámetros *in situ* como indicador de estabilidad (pH, Conductividad eléctrica, temperatura, color) para el correcto muestreo se realizó, 3) Toma de muestra (se realizó con la ayuda de una bomba volumétrica almacenando el agua en un balde aséptico y luego se procedió a pasar el flujo por un filtro de 0.45 μm) y 4) Conservación de la muestra hasta el laboratorio (se envasó 1000 mL de muestra y se las almacenó en recipientes de PVC de 500 mL bajo oscuridad y conservado en refrigeración a 5 °C hasta su análisis en el laboratorio).

2.4 Análisis de los parámetros químico

Las muestras recolectadas fueron enviadas posteriormente al laboratorio del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental tropical Pichilingue INIAP- EETP para su procesamiento, donde se cuantificó los siguientes parámetros: conductividad Eléctrica CE (dS m^{-1}), total de sólidos disueltos TSD (mg L^{-1}), calcio Ca^{2+} (mg L^{-1}), magnesio Mg^{2+} (mg L^{-1}), sodio Na^{+} (mg L^{-1}), potasio K^{+} (mg L^{-1}), bicarbonato HCO_3^{-} (mg L^{-1}), cloruro Cl^{-} (mg L^{-1}), sulfato SO_4^{-} (mg L^{-1}), hierro Fe^{2+} (mg L^{-1}), boro B (mg L^{-1}), pH, relación absorción sodio RAS ($\text{meq L}^{-1}/2$) y dureza (mg L^{-1}).

2.5 Análisis estadístico

Los parámetros hidroquímicos fueron analizados mediante estadísticas descriptivas (demostrar el comportamiento de los parámetros). Se utilizaron medidas de tendencias, distribución de los datos y se comprobó la normalidad de los datos. Posteriormente, se realizó un análisis integrando cada parámetro mediante las correlaciones que establecieron el grado de asociación entre parámetros químicos, para lo cual se utilizó el estadístico de Pearson al $p < 0.05$, de acuerdo con Hernández-Vivanco et al. (2019) quienes mencionan que la mejor forma de analizar dos o más variables para conocer el grado de coherencia es mediante de este estadístico. Finalmente, se empleó el análisis multivariante, haciendo uso de componentes principales PCA, (con la finalidad de establecer patrones en común en la determinación de la calidad del agua), por su idoneidad para reducir la dimensionalidad y explicar los parámetros químicos que más influyen en la

calidad de las aguas subterráneas. Estas herramientas son altamente precisas para obtener información integral cuando se dispone de enorme cantidad de datos que no puede ser analizada parcialmente, siendo los componentes principales, clúster y discriminatorios los que han representado mayor utilidad. de forma bajo el empleo de dos criterios los autovalores y autovectores, permitió identificar la variabilidad e integración entre parámetros (Corroto et al., 2018; Matiatos et al., 2014; Villegas et al., 2013).

2.6 Análisis Geo exploratorio

Los puntos de muestreo fueron geo localizados con un GPS Garmin 64 s con la finalidad de referenciar los datos de calidad de cada parámetro, luego se procedió a realizar una geo exploración mediante el uso de métodos de estimación espacial, con los datos de los parámetros hidroquímicos en estudio, resaltando las más relevantes en el análisis estadístico.

Para el análisis geoespacial se procedió a realizar un proceso de comparación de métodos de interpolación utilizando la validación cruzada. Se seleccionó aleatoriamente el 80% de los registros para entrenamiento y el 20% para prueba, mediante la herramienta Subset features (Geostatistical analyst). El trabajo se llevó a cabo en el Software Arcgis extensión Arc.map versión 10.3. El flujo de trabajo para la estimación geoespacial consistió en: 1) análisis y curado de datos, 2) elección del modelo de interpolación 3) análisis del modelo utilizando como parámetros de calidad el error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de determinación (r^2) para luego su validación, y 4) generación de mapas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de parámetros hidroquímicos

La calidad de agua subterránea se evalúa según diferentes criterios, dependiendo de su aprovechamiento. Varias investigaciones proponen diversas clasificaciones en función de parámetros específicos. Por ejemplo, Olías et al. (2005) consideran clasificar aguas con baja salinidad, mientras Romero (1999) establece a las aguas duras con niveles elevados de dureza. Por otra parte, Kumar et al. (2016) con un enfoque más integral, incluyen el potencial de hidrógeno y la relación absorción sodio para determinar la aptitud del agua especialmente para uso agrícola. Sin embargo, estas clasificaciones no abarcan completamente los posibles usos del agua, proporcionan información valiosa cuando se combina con otras características físico-químicas. La caracterización adecuada de estos parámetros es fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos y la toma de decisiones basada en evidencias científicas.

Los estadísticos de tendencia central y dispersión de los parámetros físicos del agua subterránea muestran que los niveles de dureza fluctuaron entre los 124 a 521 mg L^{-1} . El pH del agua se encontró entre 6.6 a 6.9, indicando una ligera acidez (Tabla 1). En cuanto a la conductividad eléctrica, la media fue de 0.7 dS m^{-1} clasificándose como de salinidad media. Por otra parte, la cantidad de sólidos totales disueltos

osciló entre 158 a 536 mg L⁻¹, lo que indica la existencia de una gran cantidad de minerales como cationes y aniones en los diferentes sitios de muestreo. La relación absorción sodio varió entre los 0.3 y 1.08 (meq L⁻¹)^{1/2}, lo que indica que el índice de sodio es relativamente bajo, al igual que los valores de conductividad de promedio.

En esta exploración, se constató que la dureza es alta, criterio que coincide con otras exploraciones, donde el agua subterránea se considera dura cuando los niveles superan los 200 mg L⁻¹ (García-López & Castro-Perdono, 2018; Julián-Soto, 2010; Robles-Valderrama et al., 2010). Mientras tanto, los valores de conductividad eléctrica, relación absorción sodio y el pH fueron bajos a intermedios, sin presentar restricciones para su uso, esta información es similar a las exploraciones de: Cabrera-Alfonso et al. (2015); Castellón-Gómez et al. (2015); Chibinda et al. (2017); Montiel-Palma et al. (2014), en las que tampoco se identificaron limitaciones o restricciones en el uso.

Ante estos hallazgos, se manifiesta que el exceso de dureza en agua puede generar ciertas limitaciones para su uso como; la presencia de incrustaciones en los sistemas de distribución de agua; problemas infiltración en suelo; reducción en la eficiencia del uso de plaguicidas; dificultades en el consumo doméstico; complicaciones en procesos industriales y posibles afecciones a la salud humana, incluyendo daños en órganos del cuerpo (Neira, 2006). En resumen, los parámetros físicos como la dureza el pH, CE y TSD en las distintas fuentes de agua ayudan a estimar de manera instantánea el potencial aprovechable del recurso hídrico para diversos fines, entre ellos la agricultura, la acuicultura, la industria, los usos domésticos y otras áreas de interés humano.

Tabla 1. Análisis descriptivo de los parámetros físicos del agua subterránea

Parámetros	MÍN	MÁX	MED	DE	ET	V
Dureza (mg L ⁻¹)	124.0	521.0	284.6	98.4	24.6	9.6E+3
pH	6.6	6.9	6.8	0.13	0.03	0.02
CE (dS m ⁻¹)	0.3	1.2	0.7	0.21	0.05	0.05
TSD (mg L ⁻¹)	158.0	536.0	325.3	100.6	25.1	1.01E+4
RAS (meq L ⁻¹) ^{1/2}	0.30	1.1	0.72	0.24	0.06	0.06

MÍN: Mínimo; **MÁX:** Máximo; **MED:** Media; **DE:** Desviación estándar; **ET:** Error típico, **V:** Varianza de la muestra

Los cationes en estudio fueron cinco más el B (Tabla 2). El calcio fue el catión que sobresale seguido de Na⁺>Mg²⁺>K⁺>Fe²⁺>B. Del global de los cationes, Ca²⁺ representó el 67 % de aporte a la calidad del agua mientras que el Na⁺ constituyó el 19.5 %. Las concentraciones de Ca²⁺ fluctuaron entre 40 a 186 mg L⁻¹ en las distintas muestras, mientras que los valores de Na⁺ se reportaron entre 10 a 42.6 mg L⁻¹.

En el grupo de aniones, el anión bicarbonato fue el predominante, seguido de Cl⁻ y SO₄²⁻. El ion bicarbonato representó el 75 % mientras que el cloruro correspondió al 24 % de los aniones presente en las muestras de agua subterránea. El HCO₃⁻ reportó valores entre 122 y 439 mg L⁻¹, y para el Cl⁻ se encontraron entre 49 a 150 mg L⁻¹ (Tabla 2).

Aunque los valores de los iones nitrato y carbonatos no se presentan en la Tabla 2, estos fueron reportados con valores de cero bajo los límites de detección del laboratorio.

Los iones positivos y negativos que mayoritariamente se encuentran en la zona de estudio son HCO₃⁻, Ca²⁺, Cl⁻ y Na⁺. Esta secuencia en términos de concentración en la solución del agua, primeramente, se le puede atribuir a la solubilización del material rocoso y a las reacciones que se llevan a cabo por los microorganismos. Ayora (2010) indica que la alta solubilidad de ciertas sales contenidas en las rocas, así como la naturaleza de los diferentes componentes presentes, influyen en la concentración predominante en el agua subterránea. A su vez, el tipo de roca encontrada en el entorno resulta determinante para los tipos de componentes, esto se ve respaldado por González-Abraham et al. (2012), quienes mencionan que la presencia de los iones Ca²⁺ y HCO₃⁻ se atribuye a la disolución de calcita (CaCO₃). Con la finalidad de brindar a detalle el tipo de agua, se clasificó de acuerdo a los componentes mayoritarios siendo bicarbonatos y calcio lo que indicaría un agua bicarbonatada cálcica, la misma que podría tener como origen a las calizas CaCO₃ (HCO₃⁻ y Ca²⁺).

Tabla 2. Análisis descriptivo de los cationes del agua subterránea

Parámetros (mg L ⁻¹)	MÍN	MÁX	MED	DE	ET	V
Ca ²⁺	40.1	186.9	93.38	36.98	9.24	1 367.51
Mg ²⁺	5.9	17.5	12.37	3.36	0.84	11.30
Na ⁺	10.7	42.6	27.3	10.2	2.5	103.7
K ⁺	2.32	10.7	6.39	2.35	0.59	5.50
Fe ²⁺	0.05	0.34	0.154	0.081	0.02	0.007
B	0.02	0.04	0.033	6E-3	1E-3	0.000
HCO ₃ ⁻	122	439.2	272.8	85.5	21.4	7 306.8
Cl ⁻	49	150.5	86.4	28.2	7.1	796.6
SO ₄ ²⁻	1.6	7.70	4.28	1.89	0.47	3.56

MIN: Mínimo; **MÁX:** Máximo; **MED:** Media; **DE:** Desviación estándar; **ET:** Error típico, **V:** Varianza de la muestra; **C:** Cationes; **A:** aniones

3.2 Análisis de la variabilidad de los parámetros hidroquímicos

La matriz de correlación de los parámetros físicos muestra correspondencia entre: conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (TSD) ($r = 0.998$), entre la CE y dureza (D) ($r = 0.981$), y entre los TSD y D con un coeficiente de ($r = 0.982$) respectivamente. En cuanto a la correspondencia entre los parámetros físicos y los cationes, se observaron correlaciones significativas entre CE y Calcio (Ca²⁺) ($r = 0.949$), la CE y Magnesio (Mg²⁺) ($r = -0.622$) y entre los TSD y Ca²⁺ ($r = 0.952$). De la misma manera, se presenta la relación absorción sodio (RAS) y Mg²⁺ ($r = 0.691$) y (RAS) con sodio (Na⁺) ($r = -0.916$). Finalmente, la dureza también mostró una alta relación con el Calcio (Ca²⁺) ($r = 0.991$).

Por otra parte, se determinó que, los parámetros físicos, como conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y dureza muestran correlación con los aniones bicarbonato (HCO₃⁻), cloruro (Cl⁻) y sulfatos (SO₄²⁻), utilizando el valor crítico de Pearson ($p < 0.05$). Además, otro hallazgo evidenciado fue que los cationes Ca²⁺ y Mg²⁺ muestran correspondencia con los aniones bicarbonato, cloruro y sulfato, mientras que el catión Na⁺ solo se correlaciona con el anión sulfato (Tabla 3).

La interacción entre los parámetros permite verificar que los procesos que ocurren en los cuerpos de agua subterránea corresponden a procesos naturales. Por ello, conocer la afinidad y disimilitud en cuanto a naturaleza y concentración muestran patrones entre ellos. En este sentido, la correspondencia mostrada entre parámetros físicos, como CE, TSD y D, coincide con literatura científica como Chibinda et al. (2017); Silva et al. (2013); Armanuos et al. (2016); Gadea-Villalba (2019); Solís-Castro et al. (2018), quienes han reportado estas relaciones en estudios de agua subterránea. En este contexto, se destaca la importancia de la CE y otros parámetros físicos para determinar la calidad del agua, ya que estos parámetros pueden variar con la evolución de agua subterránea o por la contaminación antropogénica.

Por otra parte, el análisis entre los parámetros físicos y los cationes evidenció relaciones específicas. Por ejemplo, los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} están relacionados con CE y D, mientras que Mg^{2+} y Na^+ solo guarda relación con RAS.

Estas relaciones observadas se ven respaldadas por diversos estudios. Roldán et al. (2020) y Mancilla et al. (2021) reportaron relación entre la CE, la RAS y los cationes Ca^{2+} - Mg^{2+} y Na^+ . Solís-Castro et al. (2018) concluyeron que la dureza se ve influenciada por dos cationes calcio y magnesio destacando la relación existente entre estos parámetros, mientras que Schroeder (2003) indicó que la concentración TSD se compone de cuatro cationes entre ellos el calcio, lo que refuerza las relaciones observadas en este estudio.

En resumen, la concentración de los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} afecta directamente a la CE, ya que el incremento de estos cationes aporta sales a la solución del agua subterránea. Además, el Ca^{2+} puede causar variaciones significativas en la cantidad de sólidos disueltos totales y en la dureza del agua, debido a su predominancia comparada con los otros

parámetros. Por otro lado, la relación absorción sodio se ve directamente afectada por Mg^{2+} y Na^+ , lo que convierte a estos factores determinantes para evaluar este indicador relevante como predictor para posibles problemas relacionados con la calidad del agua. En general, los cationes que mayoritariamente se encuentren en el cuerpo de agua pueden causar una alteración sobre los parámetros físicos del agua subterránea.

De igual forma, las relaciones entre los parámetros físicos y los aniones guardan concordancia con la investigación realizada por Peinado-guevara et al. (2012) y Boyd (2017), quienes mencionan que la conductividad está determinada por la especie de iones disueltos, como SO_4^{2-} , HCO_3^- y Cl^- , siendo estos los más comunes. Además, Torres-Silva & Goetschel-gomez (2020) demostraron que los aniones HCO_3^- , CaCO_3 y Cl^- se relacionan directamente con TSD. Por otra parte, Romero (1999) menciona que la dureza del agua se debe a la presencia de iones metálicos y aniones como: HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- .

En síntesis, la concentración de iones negativos como bicarbonatos, sulfatos y cloruros, en la solución del agua subterránea tienen a incrementar o a disminuir los niveles de conductividad del agua, sólidos disueltos totales y dureza según la concentración en el recurso hídrico explorado. Este fenómeno resulta de reacciones y procesos químicos continuos en los cuerpos de agua superficial o subterránea.

La relación entre iones negativos y positivos depende de cómo interactúan entre sí. Según la Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2016), los cloruros más abundantes encontrados en agua naturales son el de sodio, calcio y magnesio.

Tabla 3. Coeficiente de correlación de parámetros químicos de agua subterránea

Parámetros	CE (dS m ⁻¹)	TSD (mg L ⁻¹)	Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	Na ⁺ (mg L ⁻¹)	K ⁺ (mg L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	SO ₄ ⁼ (mg L ⁻¹)	Fe ²⁺ (mg L ⁻¹)	B (mg L ⁻¹)	pH	RAS (meq L ⁻¹)1/2	Dureza (mg L ⁻¹)
CE (dS m ⁻¹)	1													
TSD (mg L ⁻¹)	0.998**	1												
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	0.949**	0.952**	1											
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	0.622*	0.608*	0.359	1										
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	0.446	0.434	0.148	0.883**	1									
K ⁺ (mg L ⁻¹)	0.317	0.315	0.352	0.043	-0.127	1								
HCO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	0.970**	0.966**	0.911**	0.644**	0.446	0.324	1							
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	0.912**	0.914**	0.880**	0.507*	0.384	0.259	0.785**	1						
SO ₄ ⁼ (mg L ⁻¹)	0.724**	0.726**	0.612*	0.611*	0.556*	0.090	0.620*	0.786**	1					
Fe ²⁺ (mg L ⁻¹)	-0.068	-0.049	0.103	-0.498*	-0.441	-0.041	-0.213	0.183	-0.070	1				
B (mg L ⁻¹)	-0.082	-0.068	-0.045	-0.209	-0.085	0.129	-0.073	-0.082	-0.075	-0.092	1			
pH	0.205	0.179	0.030	0.489	0.540*	0.106	0.198	0.188	0.384	-0.526*	0.023	1		
RAS (meq L ⁻¹)1/2	0.066	0.054	-0.237	0.691**	0.916**	-0.305	0.066	0.057	0.319	-0.400	-0.016	0.462	1	
Dureza (mg L ⁻¹)	0.981**	0.982**	0.991**	0.481	0.265	0.337	0.948**	0.900**	0.663**	0.026	-0.073	0.099	-0.124	1

Significancia de la correlación: **. La correlación es significativa en el nivel $p < 0.01$ (bilateral). *. La correlación es significativa en el nivel $p < 0.05$ (bilateral)

Asimismo, los aniones de bicarbonatos que mayoritariamente se encuentran son calcio y magnesio (Gomella, 1999). Por otra parte, los sulfatos pueden ser utilizados como fuente de oxígeno de bacterias, y combinarse con aniones como el calcio, magnesio y sodio (CONAGUA, 2016). Esta interacción entre aniones y cationes se pondría de manifiesto, ya que se originan a partir sales disueltas en la solución del agua subterránea, generando cargas eléctricas positivas y negativas que determinan su concentración iónica.

Dado que la interacción entre los parámetros físicos y químicos influyen en la composición del agua subterránea, es fundamental el empleo de estadística multivariante con la finalidad de comprender estos efectos de manera integrada. En este sentido, en esta investigación se empleó la estadística multivariante mediante el análisis de componentes principales (ACP) para identificar la variabilidad de la calidad del agua empleando todos los parámetros hidroquímicos.

Mediante el ACP, se establecieron tres componentes que explican el 83 % de la variabilidad de las aguas subterráneas, de manera que el componente 1 (CP1) está definido por tres de los cinco parámetros físicos: CE, TSD y D, además de incluir los tres aniones analizados. Mientras que de los cationes solo se incluyó el Ca^{2+} . El componente 2 (CP2) fue definido por dos cationes Mg^{2+} , Na^+ , junto con RAS como parámetro físico. Finalmente, el componente 3 (CP3) fue definido por tres cationes K^+ , Fe^{2+} y B, además el pH como parámetro físico (Tabla 4).

La aplicación del análisis de componentes principales demostró que cada componente explica procesos importantes en la determinación de la calidad del agua subterránea. Siguiendo esta premisa, se detalla que en el caso de CP1 mayormente fue representado por calcio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos. La evidencia científica sugiere que los cambios de estos cationes y aniones provienen en su mayoría del material parental, como rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (Meraz, 2000; Rosales, 2012). Asimismo, se identificó que los aniones Cl^- y HCO_3^- provienen de la misma fuente geogénica natural debido a su relación, aunque el Cl^- también podría proceder de actividades antropogénicas en la zona, como las actividades agrícolas, descargas de aguas negras a pozos sépticos u otras fuentes. Asimismo, la interrelación entre estos aniones y cationes con los parámetros físicos explica la importancia de la dureza, conductividad eléctrica y sólidos disueltos en este componente. Estos parámetros físicos están directamente influenciados por el material parental, la interacción entre roca-agua y los procesos físico-químico que influyan de manera directa o indirecta en la disolución de sales y minerales. En resumen, el componente 1 explica el aporte de la roca con minerales y la interacción con el agua subterránea.

En cuanto al CP2, los cationes sodio y magnesio explican este componente y su vez determinan el RAS del agua. El origen del sodio y magnesio en fuentes aguas subterráneas puede ser de diferentes fuentes geológicas o actividades antropogénicas (Huerta, 2009). El enriquecimiento de origen geológico del Mg^{2+} pudiera ser por las dolomitas, así como albitas para el Na^+ (Malagón et al., 2021), incremento por la intrusión salina en acuíferos costeros (Cruz et al., 2018), o por uso continuo de

fertilizantes (Loor et al., 2019). Aunque los niveles de sodio no superaron los límites permisibles para diferentes usos, hay reportes donde muestran que cantidades superiores pueden causar diversos problemas en la salud, industria o en la agricultura. Debido a su concentración en el agua subterránea el aporte de ambos cationes son los de mayor importancia luego del calcio. Estas evidencias sugieren que estos cationes podrían estar influenciados por actividades humanas, lo que genera cambios en la calidad del agua. El componente 2 en este contexto podría explicar el comportamiento y la interacción del sodio y magnesio, así como también ser indicador para el monitoreo de la calidad del agua a problemas antropogénicos o de intrusión salina.

Finalmente, el CP3 está representado por K, Fe, B y pH. La presencia de K^+ , Fe^{2+} y el B podría estar relacionada con el material parental, aunque se han reportado variaciones atribuibles a las actividades que realiza el hombre, como lo documentan Ram et al., 2021; Tabi et al. (2024). En cuanto al pH, este claramente se ve afectado a actividades agrícolas o depósitos de pozos sépticos en las aguas subterráneas. En resumen, los componentes identificados a través del análisis multivariante demuestran que las fuentes principales de las variaciones de las aguas mayoritariamente provienen de la roca y los procesos de disolución, seguido de una interacción entre las actividades humanas y factores climáticos.

Tabla 4. Autovalores y autovectores del análisis de componentes principales de los parámetros de la calidad del agua subterránea

Parámetros	CP1	CP2	CP3
	51 %	22 %	10 %
CE (dS m-1)	0.36*	-0.11	-0.02
TSD (mg L-1)	0.36*	-0.12	-0.03
Ca^{2+} (mg L-1)	0.33*	-0.26	-0.01
RAS (meq L ⁻¹)1/2	0.08	0.51**	-0.17
Dureza (mg L-1)	0.35*	-0.20	-0.01
Mg^{2+} (mg L-1)	0.28	0.34**	-0.05
Na^+ (mg L-1)	0.23	0.43**	-0.13
K^+ (mg L-1)	0.12	-0.19	0.55***
Fe^{2+} (mg L-1)	-0.07	-0.37	-0.47***
B (mg L-1)	-0.05	-0.10	0.49***
pH	0.13	0.31	0.39***
HCO_3^- (mg L-1)	0.35*	-0.09	0.05
Cl^- (mg L-1)	0.34*	-0.13	-0.14
$\text{SO}_4^{=}$ (mg L-1)	0.32*	0.08	-0.04

CP: Componente. *: Mayor aporte al componente 1; **: Mayor aporte al componente 2; ***: Mayor aporte al componente 3

3.3 Modelado geoespacial de la calidad del agua

El uso de interpolación en la modelación espacial de los parámetros hidroquímicos del agua subterránea requiere criterios de calidad y fiabilidad, como el error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente determinación (r^2).

Tomando en consideración estos criterios de calidad, en la evaluación de los modelos, el valor global del MAE se obtuvo con EBK 14.49, seguido de KO y IDW (14.97 y 15.32, respectivamente) (Tabla 5). Estos resultados coinciden con investigaciones previas (Ahmad et al., 2021; Boudibi et al., 2021). En cuanto al RMSE, el modelo EBK presentó el valor más bajo (18.12), seguido de IDW (19.10) y K (19.13), lo que indicaría que EBK es el modelo con mayor precisión en la predicción debido a que es el que presentó valores más

cercanos a uno lo que le confiere mayor precisión en la estimación espacial (Tabla 5).

Respecto al MAE y RMSE de los parámetros Ca^{2+} , CE, HCO_3^- , Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , K^+ y pH, se obtuvieron los valores más bajos, lo que coincide con otras investigaciones (Abdullah et al., 2024; Amah & Agu, 2020; Javed et al., 2021; Lin, 2021), donde se han reportado valores similares, reflejando que el modelo presenta una calidad aceptable. Este hallazgo coincide con las conclusiones de Agerberg (2020), que destacan que el tamaño de muestra menor no genera una desviación mayor al modelo de referencia.

Sin embargo, en los parámetros TSD y D, la tendencia fue diferente, ya que mostraron un menor rendimiento debido a los valores elevados de MAE y RMSE, lo que concuerda con lo reportado por Kumari et al. (2018). No obstante, estos resultados contrastan con los hallazgos de Abdullah et al. (2024); Amah & Agu (2020) y Javed et al. (2021), quienes informaron valores bajos tanto de RMSE en los tres modelos analizados.

Los datos generados por los parámetros TSD y D presentan una alta varianza de estimación, lo que indicaría una mayor incertidumbre en su representación dentro de los diferentes modelos. Karami et al. (2018) mencionan que un valor alto de varianza de estimación está asociado a una mayor incertidumbre. Para abordar esta situación, proponen un muestreo más detallado y estudios prospectivos con el fin de reducir dicha incertidumbre.

Se estima que estos parámetros están mayormente influenciados por las actividades del entorno, lo que generaría variaciones espaciales en puntos relativamente cercanos y, en consecuencia, un aumento en la incertidumbre del modelo.

Finalmente, el coeficiente de determinación (r^2) muestra el grado de ajuste entre los datos estimados por el modelo y los observados. En este sentido, el modelo EBK presentó el mejor ajuste promedio de ($r^2 = 0.41$) superando a IDW y KO ($r^2 = 0.38$ y 0.32 , respectivamente). Sin embargo, este valor varió según el parámetro analizado, alcanzando hasta ($r^2 = 0.74$) en el caso de TSD. Otros parámetros como Ca^{2+} , CE, Cl^- , Na^+ y pH, también mostraron valores de r^2 por encima al promedio (Tabla 5).

Por otro lado, aunque los errores de estimación de los modelos son bajos para el B, el coeficiente de determinación no presentó un ajuste adecuado en ninguno de los modelos explorado. Esto podría atribuirse a la naturaleza del parámetro interpolado, ya que los valores reportados son relativamente pequeños y presentan diferencias indetectables entre los puntos muestreado, lo que lo convierte en un parámetro más sensible en comparación con el resto.

Los análisis de calidad para los parámetros hidroquímicos explorados mediante distintos métodos de interpolación, demuestra que cada método posee una precisión y aplicabilidad específica para predecir espacialmente los diferentes parámetros físico-químicos del agua subterránea. Estos métodos constituyen herramientas relevantes para evaluar la calidad de agua en grandes extensiones, debido a sus ventajas predictivas.

Cada método mostró cierto poder predictivo para los distintos parámetros fisicoquímicos; sin embargo, en la zona baja del valle del río Carrizal, el modelo EBK presentó ventajas sobre los otros dos modelos en todos los atributos de calidad, lo que coincide con lo reportado por Kumari et al. (2018).

Tabla 5. Valores error medio absoluto (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente determinación (r^2) de los modelos de interpolación de los parámetros de agua subterránea

Parámetros	MAE					RMSE					r^2				
	IDW	K	EBK	LI	LS	IDW	K	EBK	LI	LS	IDW	K	EBK	LI	LS
Ca	2.074	2.050	2.160	2.05	2.147	2.778	2.689	2.934	2.689	2.888	0.697	0.535	0.507	0.507	0.655
Mg	0.178	0.191	0.165	0.165	0.188	0.224	0.216	0.201	0.201	0.222	0.218	0.347	0.370	0.219	0.364
CE	0.244	0.248	0.227	0.227	0.247	0.305	0.296	0.287	0.287	0.303	0.675	0.217	0.718	0.217	0.705
Fe	0.051	0.059	0.049	0.049	0.056	0.062	0.067	0.058	0.058	0.065	0.330	0.249	0.392	0.249	0.376
B	0.005	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.000	0.140	0.015	0.000	0.111
HCO3	1.624	1.548	1.485	1.485	1.604	1.915	1.801	1.792	1.792	1.877	0.460	0.024	0.358	0.024	0.441
Cl	0.949	0.994	0.925	0.925	0.982	1.132	1.136	1.074	1.074	1.135	0.557	0.662	0.616	0.557	0.655
SO4	0.039	0.045	0.038	0.038	0.044	0.047	0.053	0.044	0.044	0.052	0.057	0.322	0.012	0.012	0.276
TSD	115.625	117.721	108.538	108.54	117.01	144.664	140.639	135.245	135.25	143.46	0.717	0.272	0.737	0.272	0.733
Na	0.272	0.266	0.175	0.177	0.270	0.350	0.317	0.251	0.251	0.340	0.241	0.374	0.618	0.241	0.545
K	0.062	0.069	0.066	0.062	0.068	0.081	0.085	0.086	0.081	0.086	0.267	0.459	0.327	0.270	0.420
RAS	0.182	0.224	0.166	0.166	0.215	0.213	0.236	0.195	0.195	0.228	0.075	0.024	0.208	0.024	0.164
D	93.044	86.130	88.837	86.18	92.24	115.528	120.282	111.367	111.37	119.38	0.334	0.201	0.262	0.201	0.310
pH	0.062	0.049	0.062	0.049	0.062	0.070	0.062	0.075	0.062	0.074	0.661	0.716	0.586	0.586	0.706
LI (95%)	-6.613	-6.601	-6.23			-8.257	-8.198	-7.76			0.233	0.202	0.27		
LS (95%)	37.243	36.543	35.21			46.45	46.467	43.99			0.523	0.446	0.54		
Promedio ($\bar{x}$)	15.32	14.97	14.49			19.10	19.13	18.12			0.38	0.32	0.41		

Esta superioridad podría estar relacionada con la cantidad de puntos de muestreo, ya que estudios previos han demostrado que el método EBK muestra un mejor desempeño cuando el número de muestra es limitado, en comparación a K (Wieskotten et al., 2024).

En resumen, esta investigación exploró tres métodos de interpolación como alternativas para estimar la distribución de la calidad de agua subterránea a partir de parámetros hidroquímicos. La aplicabilidad de estos métodos fortalece la utilidad de los SIG en estudios a gran escala, ya que permiten conocer el comportamiento de los parámetros hidroquímicos en zonas no muestreadas.

Los datos obtenidos proporcionan información valiosa sobre las características hidroquímicas y el comportamiento espacial en una zona de la cuenca del río Carrizal. Sin embargo, no son definitivos, ya que el área de exploración no representa la totalidad de la cuenca y no se realizó una comparación exhaustiva entre los métodos. Cabe destacar que cada método contribuye al entendimiento del recurso hídrico, por lo que su selección debe basarse en la necesidad específica y los factores limitantes. Por ejemplo, tanto el método EBK como IDW pueden ser superiores cuando la cantidad de puntos es limitada, mientras que K requiere un mayor número de datos; no obstante, este último presenta la ventaja de ser computacionalmente menos costoso (Ghachoui et al., 2024; Wieskotten et al., 2024).

Desde una perspectiva evolutiva, EBK permite evaluar la información obtenida y utilizarla para definir nuevas investigaciones. En términos de aplicabilidad, el método kriging es más adecuado para datos con alta correlación espacial, mientras que el IDW se recomienda para datos con correlación espacial débil. Este último ofrece una mayor racionalidad local, pero introduce cierta irracionalidad a nivel global, lo que puede ser útil para identificar fuentes de contaminación. En cambio, Kriging genera una distribución de bandas a lo largo de las direcciones norte-sur, lo que corresponde a las condiciones hidrogeológicas del área (Jie et al., 2013).

Las interpolaciones desarrolladas con el modelo EBK evidenciaron que los parámetros Ca^{2+} , HCO_3^- , CE, K^+ y TSD tienen a mostrar un comportamiento espacial similar entre sí (Figura 2C, D; 3A, D, G), siguiendo un patrón de incremento de sureste a noroeste. Por otro lado, el SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ , pH y RAS presentan una orientación espacial de este a oeste (Figura 2B, E; 3B, C, E, F). Finalmente, Fe^{2+} , B, D exhibieron un comportamiento contrastante respecto a los dos patrones iniciales, siguiendo una distribución de oeste a este (Figura 2A, F; 3H).

Este análisis evidencia una mayor concentración de los parámetros en la cuenca baja, en dirección aguas abajo, lo que sugiere que la topografía del terreno podría influir en dichas variaciones. Sin embargo, el Fe^{2+} , B y D presentaron una acentuación inversa, lo que indicaría la posible intervención de otros factores, como el uso y explotación del suelo por las actividades cercanas a cada zona de exploración. Estas distribuciones geográficas permiten identificar zonas con mayores concentraciones de ciertos parámetros, tal como lo indican Jamal et al. (2024), quienes reportaron un

comportamiento similar en la interpolación TDS, cloruro, sodio, magnesio y calcio.

Tanto el análisis estadístico como la modelación coinciden en que, además del factor topográfico, los factores geológicos y antropogénicos son determinantes en la distribución y variabilidad de los parámetros hidroquímicos. Es importante señalar que los resultados de los modelos no pueden generalizarse a otras regiones; sin embargo, puede servir como un punto de partida para estudios adicionales.

Safari (2002) menciona que la elección del método de interpolación depende del tipo de variable, el número de muestras y los factores regionales, por lo que no es posible aplicar un modelo de manera generalizada en todas las regiones. Por ejemplo, Jamal et al. (2024) utilizaron el método IDW con 24 muestras para modelar la distribución de varios parámetros hidroquímicos en una región de 333.79 km². De manera similar, Ghachoui et al. (2024) emplearon IDW para modelar la distribución de CE, pH y TDS con 14 muestras en una superficie de 12 km². Por otro lado, Abdullah et al. (2024) utilizaron los métodos K e IDW para estimar trece parámetros de calidad de agua subterránea en una extensión de 115 km² con 61 pozos de muestreo. Asimismo, Javed et al. (2021) aplicaron métodos de interpolación con 105 muestras para estimar la distribución espacial de seis parámetros hidroquímicos en una superficie de 3030 km².

3.1 Limitaciones e implicaciones del estudio de las aguas subterráneas

Los resultados obtenidos en este estudio reflejan la realidad de 14 puntos de muestreo que abarcan aproximadamente 140 ha. Sin embargo, la zona baja de la cuenca del río Carrizal comprende una extensión mayor, por lo que estos datos constituyen una referencia relevante, aunque no absoluta, de la realidad de toda la zona. Debido a su dimensión, pueden ocurrir cambios significativos en diferentes sitios de la cuenca (Rezende et al., 2019; Shuaibu et al., 2024).

Otro aspecto considerable para tomar en cuenta es la temporalidad. En este estudio, se consideró el mes de mayo de 2017, una etapa de transición entre la temporada lluviosa y la seca. A pesar de ello, se desconoce el comportamiento de la calidad del agua a lo largo de todo el año, lo que impide evidenciar con certeza las zonas con problemas de contaminación y sus posibles fuentes. En esta misma zona, se han explorado la fluctuación de los niveles freáticos, donde se muestran cambios significativos entre las épocas climáticas (Saldañariaga et al., 2020). De manera similar, Aveiga Ortiz et al. (2019) mencionan que la concentración de ciertos contaminantes según la época de muestreo. Además, detallan que las muestras de agua superficial, sedimentos y el embalse de la cuenca del río Carrizal presentan problemas con mercurio y zinc.

Estas evidencias refuerzan la importancia de realizar muestreos temporales al menos un muestreo durante la temporada de lluvias y la de sequía. Asimismo, se recomienda incluir análisis de metales pesados y otros contaminantes de origen orgánicos para obtener una evaluación más completa de la calidad del agua en la cuenca.

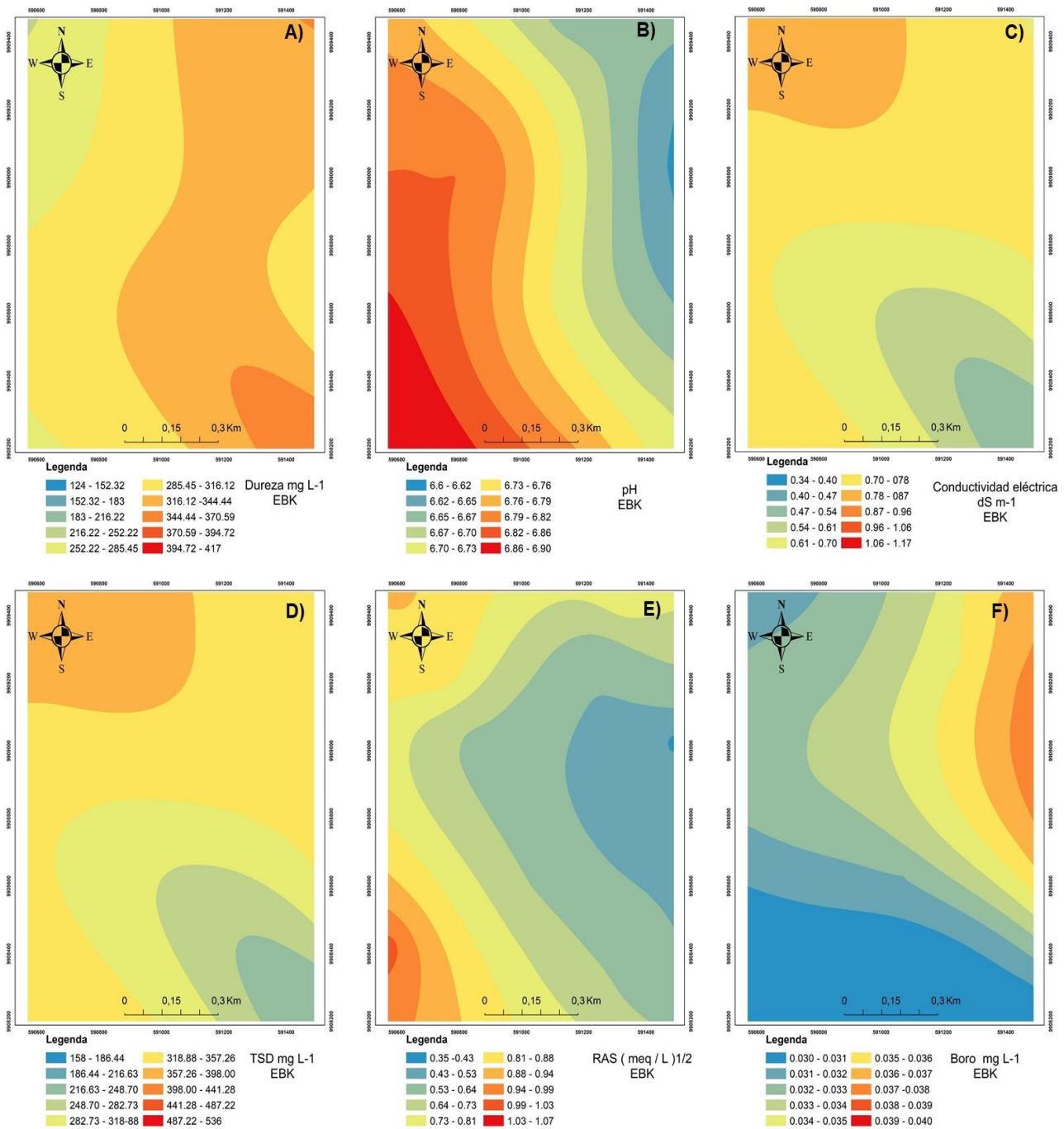


Figura 2. Interpolación del parámetro A) dureza, B) pH, C) conductividad eléctrica, D) solidos totales disueltos, E) relación absorción sodio y F) Boro

El territorio de la provincia de Manabí cuenta con 22 unidades hidrográficas, determinadas por sus características topográficas. La superficie de las cuencas litorales abarca 11.055 km², destacándose la cuenca del río Carrizal-Chone con 2.267 km² (Centro de Rehabilitación de Manabí [CRM] et al., 1991).

En este contexto, es fundamental monitorear las características hidroquímicas, e identificar fuentes de contaminación con el

fin de implementar un manejo sostenible del recurso hídrico. Para ello, la participación de los actores locales, provinciales y nacionales es esencial. Dado que las cuencas de la provincia abarcan gran extensión, resulta indispensables fortalecer el uso de SIG en las instituciones gubernamentales y privadas con énfasis en la aplicación de interpolaciones. Esto permitirá garantizar un monitoreo permanente con herramientas que brinden mayor cobertura y viabilidad en países en desarrollo.

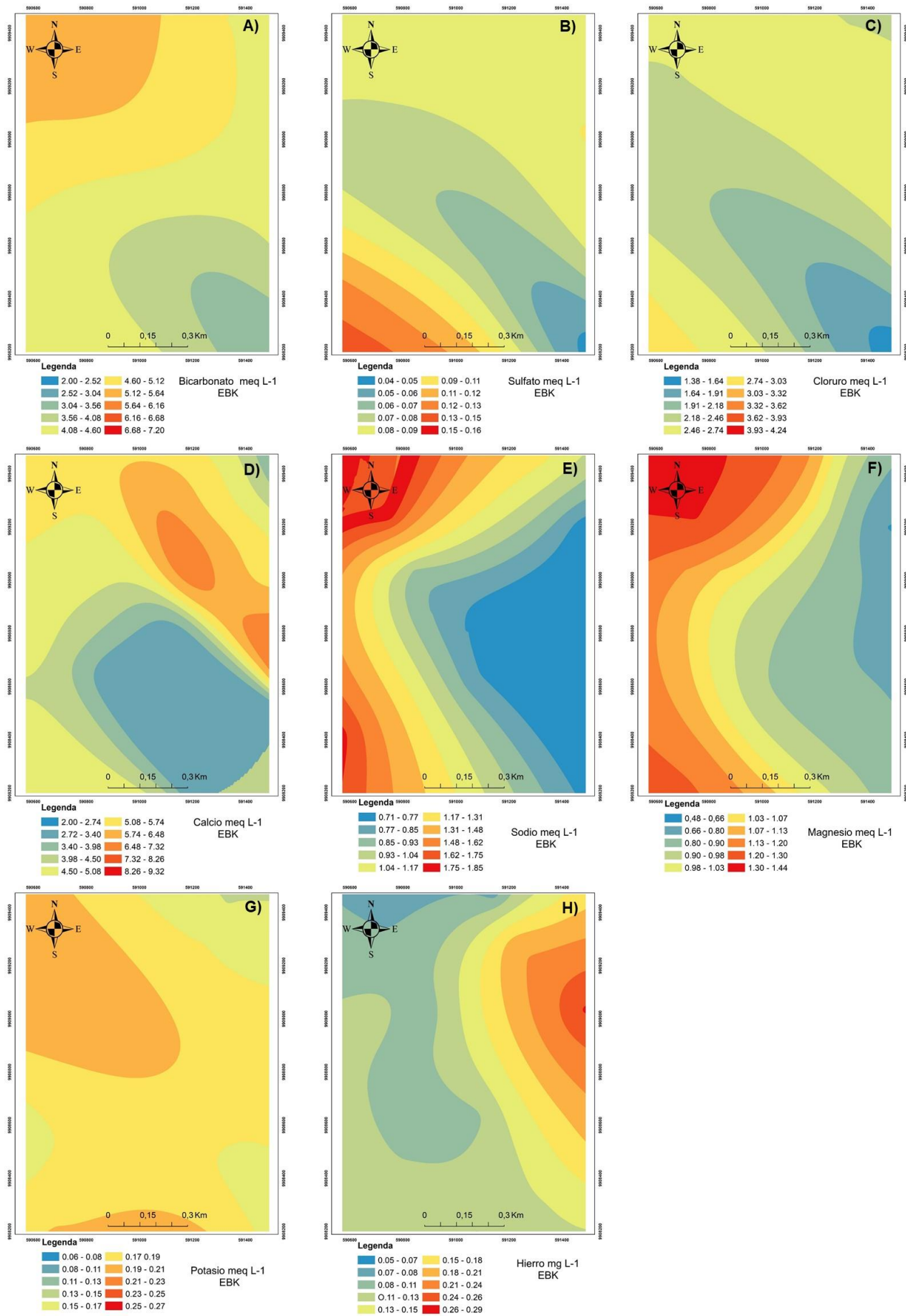


Figura 3. Interpolación del parámetro a) bicarbonatos, b) sulfatos, c) cloruros, d) calcio, e) sodio, F) magnesio, G) potasio y H) hierro

En la zona de influencia, se desarrollan diversas actividades que involucran el uso del agua, por lo que garantizar el acceso a este recurso requiere la implementar de planes de gestión ambiental sostenibles. Asimismo, es fundamental minimizar el uso excesivo de agroquímicos (pesticidas y fertilizantes), ya que estos factores contribuyen al deterioro de la calidad del agua subterránea. El éxito en la gestión de la calidad del agua para el desarrollo sostenible dependerá, en gran medida, de campañas de concienciación pública sobre los efectos negativos del deterioro de la calidad del agua en la salud humana, los campos agrícolas y las técnicas de conservación del agua de lluvia.

Actualmente, el monitoreo de este recurso sigue siendo un tema de debate, debido a los costos, la laboriosidad, y el tiempo requerido. Por esta razón, en los últimos años se han combinado diversas herramientas, como análisis estadísticos clásicos, modelos espaciales basados en SIG y técnicas de inteligencia artificial (IA). Si bien en este estudio se utilizaron dos herramientas valiosas, queda abierta la posibilidad de integrar IA en futuras investigaciones. Su aplicación ha sido empleada en estudios mediante técnicas de *machine learning* para modelar procesos hidrometeorológicos y optimizar recursos (Vargas-Crispin et al., 2021).

Estas técnicas computacionales han evolucionado progresivamente. Por ejemplo, Sahour et al. (2023) emplearon varios algoritmos para detectar los factores que influyen en los índices de calidad de las aguas subterráneas. Recientemente, Souleymane et al. (2024) utilizaron redes neuronales para predecir el flujo y transporte de contaminantes, obteniendo buenos resultados. De manera similar, Chetti (2024) destacó la importancia del uso de herramientas de simulación como estrategias efectivas para la gestión de las aguas subterráneas y mitigación de los riesgos ambientales asociados con los contaminantes.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los parámetros hidroquímicos del agua subterránea, mostraron una variabilidad espacial significativa. Los parámetros con mayor variación fueron la dureza, TDS y la concentración del catión calcio. Además, con base en la conductividad eléctrica, se establece que el agua se encuentra en un rango apto para riego. Se evidencia, que existe una relación entre la concentración de los elementos evaluados y el relieve de la zona de estudio, lo que tiende a una mayor acumulación en las zonas bajas, para las mayorías de los parámetros exploradas. Las herramientas estadísticas múltiples y las geoespaciales permiten comprender mejor el comportamiento de cuerpos de agua subterránea, lo que le confiere el atributo de herramientas idóneas para la exploración de calidad de las mismas.

Las simulaciones de distribución espacial permitieron conocer el comportamiento de los parámetros en la cuenca del valle de río Carrizal, estos datos podrían ser útiles en futuros muestreos prospectivos para obtener conclusiones más detalladas sobre toda la cuenca hidrográfica.

Se recomienda realizar un monitoreo permanente y continuo de los parámetros hidroquímicos para una gestión sostenible

del recurso hídrico, garantizando la cantidad y la calidad a los diferentes usuarios. Esta acción también permitirá desarrollar modelos predictivos con mayor precisión y exactitud.

REFERENCIAS

- Abdullah Ababakr, F., Shakeri, S., Tand, E., & Kazemi, S. (2024). Interpolation Approaches to Groundwater Quality Mapping: Trends and Techniques in Erbil City. *Advances in Civil Engineering and Environmental Science*, 1(1), 48-62. <https://doi.org/10.22034/acees.2024.475804.1007>
- Agerberg, F. (2020). *Data interpolation for groundwater modelling: How choice of interpolation method and sample size affect the modelling results (Dissertation)*. Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-79577>
- Ahmad, A. Y., Saleh, I. A., Balakrishnan, P., & Al-Ghouti, M. A. (2021). Comparison GIS-Based interpolation methods for mapping groundwater quality in the state of Qatar. *Groundwater for Sustainable Development*, 13(March), 100573. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100573>
- Amah, V. E., & Agu, F. A. (2020). Geostatistical modelling of groundwater quality at Rumuola community, Port Harcourt, Nigeria. *Asian J Environ Ecol*, 12(1), 37-47. https://doi.org/10.9734/AJEE/2020/v12i1_30152
- Armanuos, A. M., Negm, A. M., & Saavedra Valeriano, O. C. (2016). Groundwater Quality Investigation Using Multivariate Analysis — Case Study: Western Nile Delta Aquifer, Egypt. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(1), 9. <http://www.ijesd.org/vol7/732-A3008.pdf>
- Aveiga Ortiz, A. M., Noles, P., De la Cruz, A., Peñarrieta, F., & Alcántara, F. (2019). Variaciones físico-químicas de la calidad del agua del río Carrizal en Manabí. *Enfoque UTE*, 10(3), 30-41. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n3.423>
- Ayora, M. (2010). *Análisis de agua* (pp. 1-47). Universidad de Jaén. http://www4.ujaen.es/~mjayora/docencia_archivos/Quimica_analitica_ambiental/tema_10.pdf
- Belkhir, L., Boudoukha, A., & Mouni, L. (2011). A multivariate statistical analysis of groundwater chemistry data. *International Journal of Environmental Research*, 5(2), 537-544. <https://doi.org/10.22059/ijer.2011.338>
- Boudibi, S., Sakaa, B., & Benguega, Z. (2021). Spatial variability and risk assessment of groundwater pollution in El-Outaya region, Algeria. *Journal of African Earth Sciences*, 176(January), 104135. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104135>
- Boyd, C. (2017). *Conductividad eléctrica del agua, parte 1* (Número October 2017, pp. 1-6). Resonsible Seafood Advocate. <https://www.globalseafood.org/advocate/conductividad-electrica-del-agua-parte-1/>
- Cabrera-Alfonso, J., Ponce-De León Lima, D., Cervantes-Beyra, R., Vargas-Rodríguez, H., & Domínguez-Palacio, D. (2015). Distribución espacial de la calidad de las aguas subterráneas utilizadas para el riego. *Revista*

- Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(3), 13-21. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93241559002>
- Castellón-Gómez, J. J., Bernal Muñoz, R., & Hernández Rodríguez, M. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*, 19(1), 39-50. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750924004.pdf>
- Centro de Rehabilitación de Manabí, Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos, & Coordinación del Consejo Nacional de Desarrollo. (1991). *Plan Integral de Desarrollo de los recursos hídricos de la provincia de Manabí. Republica del Ecuador*. <https://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea40s/begin.htm#Contents>
- Cerón, L. M., Sarria, J. D., Torres, J. S., & Soto-Paz, J. (2021). Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico. *Informacion Tecnológica*, 32(1), 47-56. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000100047>
- Chetti, A. (2024). Simulating groundwater flow and contaminant transport. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 5(2), e11625. <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-644>
- Chibinda, C., Arada-Pérez, M. de los A., & Pérez-Pompa, N. (2017). Caracterización por métodos físico-químicos y evaluación del impacto cuantitativo de las aguas del Pozo la Calera. *Rev. Cubana Quím.*, 29(2), 303-321. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v29n2/ind10217.pdf>
- Chou, W. R., Fang, L. S., Wang, W. H., & Tew, K. S. (2012). Environmental influence on coastal phytoplankton and zooplankton diversity: A multivariate statistical model analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(9), 5679-5688. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2373-3>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas Potabilizadoras de*. www.conagua.gob.mx
- Corroto, F., Gamarra, O., & Barboza, E. (2018). Evaluación multivariante de la calidad del agua en la cuenca del Utcubamba (Perú). *Tecnología y ciencias del agua*, 9(5), 33-57. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-02>
- Cruz Falcón, A., Troyo Diéguez, E., Murillo Jiménez, J. M., García Hernández, J. L., & Murillo Amador, B. (2018). Familias de agua subterránea y distribución de sólidos totales disueltos en el acuífero de La Paz Baja California Sur, México. *Revista terra Latinoamericana*, 36(1), 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.316>
- Fernández-Cirelli, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Revista Química Viva*, 11(3), 147-170. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86325090002>
- Gadea-Villalba, M. A. (2019). Determinación de los niveles de salinidad del Acuífero Patiño. *Reportes científicos de la FACEN*, 10(2), 77-90. <https://doi.org/http://doi.org/10.18004/rcfacen.2019.10.2.77>
- Gadelha, A. J. F., Rocha, C. O. da, Veras Neto, J. G., & Gomes, M. A. (2023). Multivariate statistical analysis of physicochemical parameters of groundwater quality using PCA and HCA techniques. *Ecletica Química*, 48(4), 37-47. <https://doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v48.4.2023.p37-47>
- García-López, B. C., & Castro-Perdono, N. (2018). 50 Comportamiento catiónico en las agua subterráneas de la provincia cienfuegos y su efecto en la salud. *Universidad y Sociedad*, 10(5), 372-378. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-362020180005000372&lng=es&tlng=es
- Ghachoui, E., Taouil, H., Naser, R. S. M., & Said, I. A. (2024). Spatial assessment of groundwater quality for drinking In Souk El Arbaa, Morocco. *Water Supply*, 24(4), 1267-1281. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.059>
- Giménez-Forcada, E., Vega-Alegre, M., & Timón-Sánchez, S. (2017). Characterization of regional cold-hydrothermal inflows enriched in arsenic and associated trace-elements in the southern part of the Duero Basin (Spain), by multivariate statistical analysis. *Science of the Total Environment*, 593-594, 211-226. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.071>
- Giordano, M., & Villholth, K. (2007). *The agricultural groundwater revolution opportunities and threats to development* (CABI (ed.); Sri Lanka, Vol. 3). International Water Management Institute, Colombo.
- Gomella. (1999). *Tratamiento de aguas para abastecimiento público* (S. Editores técnicos asociados (ed.)).
- González-Abraham, A., Fagundo-Castillo, J., Carrillo-Rivera, J., & Rodríguez-Estrella, R. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcánicas de Loreto. En *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana* (Vol. 64, Número 3). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222012000300005&lng=es&tlng=es
- Hernández-Vivanco, L., Villarreal-Manzo, L. A., Ramírez-Valverde, B., Ocampo-Fletes, I., Jaramillo-Villanueva, J. L., & Ortiz-Espejel, B. (2019). Distribución espacial y temporal de aprovechamientos de agua del acuífero del Valle de Tecamachalco, Puebla. *Ambiente y Desarrollo*, 22(42), 1-11. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd22-42.deta>
- Huerta Vásquez, G. (2009). *Hidrogeoquímica de Aguas Subterráneas en la Cuenca del Estero Punitaqui, IV Región*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103322>
- Jamal, A. S. I., Jhumur, N. T., Ali Shaikh, M. A., Moniruzzaman, M., Uddin, M. R., Bakar Siddique, M. A., Al-Mansur, M. A., Akbor, M. A., Tajnin, J., Ahmed, S., & Mahmud, R. (2024). Spatial distribution and hydrogeochemical evaluations of groundwater and its suitability for drinking and irrigation purposes in kaligonj upazila of satkhira district of Bangladesh. *Heliyon*, 10(7), e27857. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27857>
- Javed, Z., Chand, S., & Ahmad, M. (2021). Spatial statistical analysis of groundwater quality based on inverse distance weighting and ordinary kriging in District Sheikhpura, Pakistan. *Desalination and Water Treatment*, 235, 324-332. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27653>
- Jie, C., Hanting, Z., Hui, Q., Jianhua, W., & Xuedi, Z. (2013). Selecting Proper Method for Groundwater Interpolation Based on Spatial Correlation. *2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, 1192-1195. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2013.282>
- Julián-Soto, F. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones

- domésticas sanitarias. *Ingeniería investigación y tecnología*, 11(2), 167-177.
- Karami, S., Madani, H., Katibeh, H., & Fatehi Marj, A. (2018). Assessment and modeling of the groundwater hydrogeochemical quality parameters via geostatistical approaches. *Applied Water Science*, 8(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0641-x>
- Kumar, P. M., Kumar, S. A., Pradeep, T., Suresh, M., & Ramesh, S. (2016). Assessment of the Groundwater Quality for Irrigation Purposes in Rasipuram Taluk, Tamilnadu, India. *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, 6(10), 547-553. <https://doi.org/10.5958/2249-7315.2016.01033.9>
- Kumari, N., Sakai, K., Kimura, S., Nakamura, S., Yuge, K., & Gunarathna, M.H.J.P. Ranagalage, Manjula Duminda, D. (2018). Interpolation methods for groundwater quality assessment in tank cascade landscape: A study of ulagalla cascade, Sri Lanka. . . *Applied Ecology and Environmental Research*, 16, 5359-5380. https://doi.org/10.15666/aeer/1605_53595380
- Lin, H. (2021). Assessment of Optimum Interpolation Method to Estimate Groundwater Chemical Data. *Water and Environmental Sustainability*, 1(2), 41-47. <https://doi.org/10.52293/WES.1.2.4147>
- Loor Bruno, Á. C., Carrión Rodríguez, R. A., & Mantilla Campaña, G. V. (2019). Vulnerabilidad de los acuíferos ante la percolación de agroquímicos en el cantón Gral. Antonio Elizalde. *Universidad y Sociedad*, 11(2), 395-401. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202019000200395&lng=es&tlng=es
- 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. <https://doi.org/10.18268/bsgm2021v73n3a070421>
- Mancilla, O., Anzaldo, B., Guevara, R., Hernandez, O., Palomera, C., Figueroa, Y., Ortega, H., Flores, H., Can, Á., Cruz, E., Sanchez, E., Olguin, J., & Mendoza, I. (2021). Calidad del agua subterránea para uso agrícola en Zacoalco de Torres y Autlan de Navarro, Mexico. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-12. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.745>
- Market-Andrea. (2016). *Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: muestreo de aguas subterráneas* (V. Morales, A. Constantin, & C. Cardich Salazar (eds.); Número Setiembre). Ministerio del Ambiente, Lima, Peru. <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2018/08/MANUAL-DE-BUENAS-PRACTICAS-MUESTREO-AGUA.pdf>
- Matiatos, I., Alexopoulos, A., & Godelitsas, A. (2014). Science of the Total Environment Multivariate statistical analysis of the hydrogeochemical and isotopic composition of the groundwater resources in northeastern. *Science of the Total Environment*, The, 476-477, 577-590. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.042>
- Meraz, J. G. (2000). Algunas relaciones iónicas simples para determinar la calidad del agua subterránea en un distrito de riego en Mexico. *Ingeniería Hidráulica en México*, 15(3), 117-125.
- Montiel-Palma, S., Armienta Hernández, M., Rogríguez, Castillo, R., & Domínguez Mariani, E. (2014). Identificación de zonas de contaminación por nitratos en el agua subterránea de la zona sur de la cuenca de México. *Rev. Internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 149-165. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000200003&lng=es&tlng=es
- Nagaraju, A., Thejaswi, A., & Sreedhar, Y. (2016). Assessment of Groundwater Quality of Udayagiri area, Nellore District, Andhra Pradesh, South India Using Multivariate Statistical Techniques. *Earth Sciences Research Journal*, 20(4), E1-E7. <https://doi.org/10.15446/esrj.v20n4.54555>
- Neira Gutierrez, M. A. (2006). Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile [Universidad de Chile]. En *Universidad de Chile*. http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2006/neira_m/so_urces/neira_m.pdf
- Olías, M., Cerón, J. C., & Fernández, I. (2005). Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del U.S. Laboratory Salinity (USLS). *Geogaceta*, 37(June), 111-113.
- Peinado-guevara, H., Green-ruíz, C., Herrera-barrientos, J., Escolero-fuentes, O., Delgado-rodríguez, O., Belmonte, S., & Guevara, M. L. De. (2012). Relationship between chloride concentration and electrical conductivity in groundwater and its estimation from vertical electrical soundings (VESs) in Guasave , Sinaloa , Mexico. *Ciencia e Investigación Agraria*, 39(1), 229-239. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202012000100020>
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water - analyses. *American geophysical union*, 914-928.
- Ram, A., Tiwari, S. K., Pandey, H. K., Chaurasia, A. K., Singh, S., & Singh, Y. V. (2021). Groundwater quality assessment using water quality index (WQI) under GIS framework. *Applied Water Science*, 11(2). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01376-7>
- Rezende, D., Nishi, L., Coldebella, P. F., Mantovani, D., Soares, P. F., Junior, N. C. V., Vieira, A. M. S., & Bergamasco, R. (2019). Evaluation of the groundwater quality and hydrogeochemistry characterization using multivariate statistics methods: case study of a hydrographic basin in Brazil. *Desalination and Water Treatment*, 161, 203-215. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24269>
- Robles-Valderrama, E., Ramírez-Flores, E., Ayala-Patiño, R., Durán-Díaz, Á., Sáinz-Morales, M. G., Martínez-Pérez, M. E., Martínez-Rodríguez, B., & González-Arreaga, M. E. (2010). Calidad Del Agua De Tres Pozos De La Zona Centro Del Acuífero Cuautla-Yautepec, Morelos, México. *Biocyt*, 3(11), 159-175. <http://www.iztacala.unam.mx/biocyt>
- Roldán, M., Yfran Elvira, M. de las M., & Rodríguez, S. C. (2020). Correlación entre cationes y aniones presentes en aguas de perforación del departamento de Saladas-Corrientes. En *Agrotecnia* (Vol. 30, Número 1). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.30972/agr.0304662>

- Romero, J. A. (1999). Potabilización del agua. En Alfaomega (Ed.), *Suparyanto dan Rosad 2015* (Colombiana, Vol. 3).
- Rosales, T. (2012). Reconocimiento químico e isotópico del acuífero costero de La Paz, B.C.S.: Evaluación de una posible intrusión marina. En *Tesis previa a la obtención Maestro en ciencias en Ciencias de la Tierra*. Centro de Investigación científica y de educación superior de ensenada, Baja California.
- Safari, M. (2002). *Determination filtration network of Groundwater using geostatistic method*. Tarbiyat Modares University Agricultural.
- Sahour, S., Khanbeyki, M., Gholami, V., Sahour, H., Kahvazade, I., & Karimi, H. (2023). Evaluation of machine learning algorithms for groundwater quality modeling. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(16), 46004-46021. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25596-3>
- Saldarriaga, V., Chavarria, J., Guzman, A., & Tarazona, N. (2020). Efecto de las variables climáticas sobre la fluctuación del nivel freático en suelos fluvisoles del valle del río Carrizal. *Ciencia y Tecnología*, 13(2). <https://doi.org/10.18779/cyt.v13i2.393>
- Schroeder, E. (2003). *Water resources*. University of California, Davis.
- Shuaibu, A., Kalin, R. M., Phoenix, V., Banda, L. C., & Lawal, I. M. (2024). Hydrogeochemistry and Water Quality Index for Groundwater Sustainability in the Komadugu-Yobe Basin, Sahel Region. *Water*, 16(4), 601. <https://doi.org/10.3390/w16040601>
- Silva, J. T., Moncayo, R., Ochoa, S., Estrada, F., Cruz-Cárdenas, G., Escalera, C., Villalpando, F., Nava, J., Ramos, A., & López, M. (2013). Calidad química del agua subterránea y superficial en la cuenca del Río Duero, Michoacán. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(5), 127-146. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000500009&lng=es&tlng=es.
- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
- Souleymane, Z., Bernard Lamien, Mohamed Beidari, & Tougri Inoussa. (2024). Numerical simulation of pollutants transport in groundwater using deep neural networks informed by physics. *Gulf Journal of Mathematics*, 16(2), 337-352. <https://doi.org/10.56947/gjom.v16i2.1863>
- Stiff, H. (1951). The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3(10), 15-3. <https://doi.org/10.2118/951376-g>
- Tabi, R., Gibrilla, A., Boakye, P., Agyemang, F., Foaah, A., & Oduro-Kwarteng, S. (2024). Appraisal of groundwater quality and hydrochemistry in three regions of Ghana: Implications for drinking purposes. *Groundwater for Sustainable Development*, 26(101193). <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101193>
- Tayyab, M., Aslam, R. A., Farooq, U., Ali, S., Khan, S. N., Iqbal, M., Khan, M. I., & Saddique, N. (2023). Comparative Study of Geospatial Techniques for Interpolating Groundwater Quality Data in Agricultural Areas of Punjab, Pakistan. *Water*, 16(1), 139. <https://doi.org/10.3390/w16010139>
- Torres-silva, S., & Goetschel-gomez, L. (2020). Análisis físico - químico e influencia de los minerales disueltos en el sabor del agua potable , de las principales plantas de tratamiento de Quito. *Enfoque UTE*, 57-70. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n4.533>
- Vargas-Crispin, W. S., Montes-Raymundo, E., Castrejón-Valdez, M., & Hinojosa-Benavides, R. A. (2021). Machine Learning como Herramienta para Determinar la Variación de los Recursos Hídricos. *Scientific Research Journal CIDI*, 1(1), 56-69. <https://doi.org/10.53942/srjcdi.v1i1.46>
- Varouchakis, E. A., & Hristopulos, D. T. (2013). Comparison of stochastic and deterministic methods for mapping groundwater level spatial variability in sparsely monitored basins. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2527-y>
- Vélez, J. C., & Betnacer, D. A. (2005). *Elaboración de planos de Isobatas como instrumento de optimización de recursos y dirección de trabajos en drenaje* (p. 19). AUGURA. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/19414/45015_60767.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Villegas, P., Paredes, V., Betancur, T., & Ribeiro, L. (2013). Assessing the hydrochemistry of the Urabá Aquifer , Colombia by principal component analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 134, 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.08.011>
- Weerasinghe, N. M. A. N., Nawarathna, L. S., & Pitawala, H. M. T. G. A. (2024). Assessing groundwater quality in the northwestern coastal area of Sri Lanka using multivariate statistical techniques. *Ceylon Journal of Science*, 53(4), 559-568. <https://doi.org/10.4038/cjs.v53i4.8210>
- Wieskotten, M., Crozet, M., Iooss, B., Lacaux, C., & Marrel, A. (2024). A Comparison Between Bayesian and Ordinary Kriging Based on Validation Criteria: Application to Radiological Characterisation. *Mathematical Geosciences*, 56(1), 143-168. <https://doi.org/10.1007/s11004-023-10072-y>
- Zaresefat, M., Derakhshani, R., & Griffioen, J. (2024). Empirical Bayesian Kriging, a Robust Method for Spatial Data Interpolation of a Large Groundwater Quality Dataset from the Western Netherlands. *Water*, 16(18), 2581. <https://doi.org/10.3390/w16182581>

BIOGRAFÍAS



Veris, Saldarriaga. Ingeniero Agrícola de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, en la actualidad Maestrante en Biotecnología Vegetal en la Universidad Técnica de Manabí. Técnico Docente de la carrera de Ingeniería Agrícola en la Escuela Superior Politécnica

Agropecuaria de Manabí “MFL”. Experiencia como investigador junior donde se publicó los resultados obtenidos en cuanto a niveles freáticos, desarrollo de publicaciones como artículos científicos y ponencias, colaboración en el análisis e interpretación de datos estadísticos provenientes de experimentos e investigaciones exploratorias concerniente a suelos, aguas y plantas.



Freddy, Mecías, Ingeniero Químico por la Universidad de Guayaquil; Diplomado en docencia Universitaria; Magister en Ciencias Ambientales; Mención Tecnologías y Gestión; Investigador acreditado en la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e

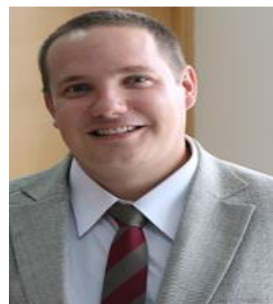
Innovación (SENESCYT), en el área ciencias de la vida. Docente investigador; Responsable Operativo de la Unidad de Docencia Investigación y Vinculación; Coordinador de año de la carrera de Ingeniería Agrícola de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Manuel Félix López (ESPAM MFL) Ecuador. Con experiencia docente en nivel superior. Participación como ponente y publicaciones en eventos académicos. Autor y coautor de varios artículos científicos y proyectos de investigación.



Ángel, Cedeño, Magíster en Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra, mención Información de Tierras para la Planificación de Territorio; Ingeniero Agrícola. Actualmente se desempeña como docente investigador y coordinador de la carrera de Ingeniería Agrícola en la Escuela Superior Politécnica

Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López (ESPAM MFL) en Ecuador. En la actualidad cursa el programa de doctorado en la Universidad de Córdoba. Cuenta con experiencia en levantamientos topográficos, tratamientos de cultivos, elaboración de mapas temáticos y docencia universitaria. Ha participado como ponente y publicado en

eventos académicos. Es colaborador y autor de artículos científicos y proyectos de investigación.



Cristian, Valdivieso, Ing. Agrícola por la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Máster en Hidráulica y Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Valencia – España y Doctor en Ciencias Agrarias y Ambientales por la Universidad de Castilla La

Mancha – España. Docente investigador por más de 8 años en la carrera de Ingeniería Agrícola de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, director de proyectos de investigación y vinculación.



Dilmo, García, Ing. Agrícola por la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Master en Nutrición de Plantas y Biofertilizante por el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (Mayabeque - Cuba). Docente de la carrera Ingeniería Agrícola y Agroforestal de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí,

responsable de la Unidad de Docencia Investigación y Vinculación de Mecanización Agrícola.

