

ACIPET

Modelado estadístico de iones presentes en aguas de producción en diferentes cuencas colombianas

M. Hernández, J. Jiménez, N. Santos

Categoría: Marque con una "X"

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.
Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

Resumen

La caracterización de las aguas de formación toma un papel importante en la industria de los hidrocarburos, ya que permite estudiar el sistema petrolífero y articular herramientas que optimicen la producción de los pozos junto a procesos de modelado experimental y simulado, mediante estudios de daño de formación (reducción de permeabilidad por formación de escamas inorgánicas, principalmente), que determinen la factibilidad de inyección de agua y aumenten la recuperación de aceite. No obstante, en muchas ocasiones los Análisis Físicoquímicos (AFQ's) que se realizan a las aguas de formación no cuentan con información de algunos iones importantes, generando incertidumbre de posibles reacciones con el agua de inyección. En este sentido, la presente investigación llevó a desarrollar correlaciones matemáticas con coeficientes de determinación (R^2) superiores al 70% que buscan estimar la concentración de iones faltantes como Na^+ , Mg^{++} y Sr^{++} , a partir de 1691 AFQs de pozos colombianos que presentaban información completa y condiciones aceptables (aniones y cationes completos y % BI (Balance Iónico) $< 15\%$).

Con el fin de obtener una mejor estimación de los iones (coeficientes de determinación más altos) las correlaciones generadas se realizaron por cuencas, logrando recuperar alrededor de 7000 datos en 2315 análisis físicoquímicos. Así mismo, se encontraron relaciones entre las variables estudiadas que pueden brindar información relevante en todas las fases de la vida productiva de los yacimientos y que podrá ser usada para mejorar la rentabilidad de los campos petroleros colombianos.

Introducción

El cálculo de la concentración de iones en el agua de formación mediante un Análisis Físicoquímico (AFQ) no siempre es tarea sencilla, ya que en muchas ocasiones no se cuenta con los reactivos o equipos adecuados para dicho fin. Esta problemática se presenta mucho a la hora de identificar metales como sodio, potasio, calcio, hierro, entre otros. En este sentido, los Análisis Físicoquímicos de muchas aguas de formación son reportados de forma incompleta por falta de insumos, lo cual no permite calcular el error del balance iónico ni tampoco la tendencia incrustante del agua, hablando de escamas inorgánicas de carbonatos y sulfatos.

A medida de los años se ha observado la importancia de la caracterización de aguas de producción, ya que las propiedades de estas aguas son fuente rica en información concerniente a la roca en la que reside, y puede proporcionar datos decisivos para los análisis en cada una de las fases de la vida productiva de un yacimiento e incidir significativamente en la rentabilidad de un campo. El análisis de formación tanto en condiciones de fondo de pozo como en condiciones de superficie contribuye a la comprensión y el desarrollo de los yacimientos, teniendo en cuenta que las propiedades del agua de formación varían entre un yacimiento y otro, y dentro de un mismo yacimiento (Abdou, et al., 2011).

Usualmente, en las aguas de formación es posible encontrar los siguientes iones: Sodio (Na^+), Magnesio (Mg^{++}), Potasio (K^+), Estroncio (Sr^{++}), Calcio (Ca^{++}), Hierro (Fe^{++}), Bario (Ba^{++}), Cloruros (Cl^-), Sulfatos (SO_4^-), Carbonatos (CO_3^-) y Bicarbonatos (HCO_3^-). Sin embargo, la información reportada en las bases de datos en algunas ocasiones es incompleta, ya que no se registran valores para algunos de los iones más comunes como Na^+ , Mg^{++} , K^+ y Sr^{++} . Teniendo en cuenta lo anterior, es posible recurrir a métodos estadísticos para estimar la concentración de dichos iones mediante correlaciones matemáticas, partiendo de un grupo de AFQ's que sí cuentan con la información reportada completa, tal y como se realizó en el presente trabajo de investigación para los iones Na^+ , Mg^{++} y Sr^{++} , obteniendo coeficientes de determinación (R^2) superiores al 70%.

La base de datos inicial para este trabajo contaba con 7873 AFQ's de aguas de formación de campos colombianos. 1691 de estos análisis contaban con valores reportados de todos los iones presentes, los cuales fueron utilizados para obtener las correlaciones matemáticas y lograr rescatar la mayor cantidad de AFQ's posibles de los 6182 restantes.

Debido a que la composición del agua depende de una serie de parámetros que incluyen el ambiente deposicional, la mineralogía de la formación, su historia de presión y temperatura, y el influjo o la migración de los fluidos (Abdou, et al., 2011), y con el fin de obtener coeficientes de determinación más altos, los 1691 AFQ's fueron categorizados por cuencas petrolíferas, teniendo en cuenta el campo al que pertenecían, de tal forma que se pudieran obtener R^2 superiores al 70%.

Al aplicar dichas correlaciones se lograron recuperar 2315 análisis fisicoquímicos. Así mismo, se encontraron relaciones entre las variables estudiadas que pueden brindar información relevante en el área petrofísica y de yacimientos para cada una de las cuencas.

Consideraciones teóricas de las aguas de formación y/o producción

El término “agua de formación” se refiere al agua que se encuentra juntamente con el petróleo y el gas en los yacimientos de hidrocarburo. Puede tener diferentes concentraciones de sales minerales. Esta agua proviene de los estratos enológicos ubicados a miles de pies de profundidad, se encuentra a temperaturas demasiado altas y es altamente toxica para la vida animal y vegetal. Contiene hidrocarburos y sales cuyas concentraciones promedian entre 70.000 y 110.000 ppm pudiendo llegar hasta 200.000 ppm, lo que constituye un nivel de salinidad casi seis veces más elevado que el agua del mar. (Barba Diaz & Martinez Villarreal, 2009)

Los analisis de agua son realizados en laboratorio y de allí se pueden obtener mediciones exactas sobre las muestras de agua. Sin embargo, algunas de las propiedades pueden cambiar despues del muestreo, por ende estas se deben determinar de manera exacta solo mediante analisis en sitio. Es por esto por lo que un analisis completo de cualquier agua se complementa con un analisis de laboratorio y un analisis en sitio (campo).

La tabla 1 muestra los iones por los cuales esta compuesta un agua de formación:

Tabla 1. Iones que conforman un agua de formación.

CATIONES	Sodio (Na^+) Calcio (Ca^{++}) Magnesio (Mg^{++}) Hierro (Fe^{+3} & Fe^{+2}) Bario (Ba^{++}) Estroncio (Sr^{++}) Potasio (K^+)	ANIONES	Cloruro (Cl^-) Sulfato (SO_4^-) Bicarbonato (HCO_3^-) Carbonato (CO_3^-) Sulfuros acidos (HS^-)
-----------------	---	----------------	--

Además de esto, las aguas de formación también están compuestas por diferentes propiedades como lo son la densidad, gravedad especifica, factor volumétrico de formación, resistividad, conductividad, tensión superficial, viscosidad, conductividad, tensión superficial, viscosidad, alcalinidad, entre otros. Sin embargo, en la presente investigación solo se tuvo en cuenta el comportamiento de los iones presentes.

Cuencas Sedimentarias Colombianas

Una cuenca sedimentaria es una región subsidente (hundimiento progresivo de un sector de la corteza). La existencia de una cuenca sedimentaria está ligado a un espacio subsidente. Mientras haya subsidencia, habrá cuenca sedimentaria, cuando se pare se colmará (Peña, 2014)

Colombia presenta 23 cuencas, 15 de estas se categorizan como no productoras y los 7 restantes como cuencas productoras de hidrocarburos. Entre las cuencas productoras se encuentran: Caguán-Putumayo, Catatumbo, Cordillera Oriental, Llanos Orientales, Valle Inferior Magdalena, Valle Medio Magdalena y Valle Superior Magdalena.

Para la presente investigación, se obtuvieron correlaciones solo para 5 cuencas las cuales fueron: Llanos Orientales, Valle Medio Magdalena, Valle Inferior Magdalena, Valle Superior Magdalena y Caguán-Putumayo.

Cuenca Llanos Orientales. Limita al Norte con Venezuela, al sur con la Serranía de la Macarena, el Arco de Vaupés y las rocas metamórficas precámbricas, al oeste con el sistema de cabalgamiento de la cordillera oriental y al oriente con las rocas precámbricas del escudo Guayana. Se ubica entre los departamentos de Meta, Arauca, Casanare, Guainía y Guaviare. Esta

cuenca produce diariamente en promedio cerca de 425 kbpd, de los cuales 187.000 son crudos pesados, 121.000 son crudos medianos y 116.000 son crudos livianos. La gravedad API varía entre los 22 y 42 °API. La principal roca generadora en esta área son las lutitas marino-continetales de la Formación Gachetá, localizadas por debajo del flanco oriental de la Cordillera Oriental. Estas rocas poseen rangos de TOC entre 1-3% y un espesor efectivo de 150-300 pies. Las arenitas de las formaciones Carbonera (C-3, C-5 y C-7) y Mirador (Paleógeno) Guadalupe y Une son excelentes almacenadoras de hidrocarburos. En la secuencia cretácica algunos intervalos arenosos son también excelentes reservorios. Su rango de porosidad varía entre el 10-30%. (Barrero, Pardo, Vargas, & Martínez, 2007)

Cuenca Valle Medio Magdalena: Esta cuenca está ubicada a lo largo de la porción central del Valle del Río Magdalena, entre las cordilleras oriental y central en los Andes colombianos; es una de las cuencas más exploradas y prolíficas del país, y en ella se han descubierto cerca de 2.412 MBP y 2.5 TPCG localizados en más de 50 campos, entre ellos, el primer campo gigante descubierto en Colombia (La Cira- Infantas). El potencial exploratorio de la cuenca se estima entre 8.000 MBP (alto) y 600 MBP (Bajo).

Esta cuenca produce diariamente en promedio cerca de 99.000 bpd, de los cuales 65.000 son crudos pesados, 32.000 son crudos medianos y 1.600 son crudos livianos. La gravedad API varía entre los 14,1 y los 40 °API. Las principales rocas fuente en la cuenca fueron depositadas durante dos eventos anóxicos globales y corresponden a las Calizas y Lutitas de las formaciones La Luna, Simití y Tablazo.

El 97% del petróleo probado en la cuenca proviene de areniscas continentales cenozoicas (Formaciones Lizama, Esmeraldas, La Paz, Colorado y Mugrosa), con promedios de porosidad entre 15-20% y permeabilidad de 20-600 md. Los depósitos Calcáreos fracturados (Grupo Calcáreo Basal y Formación La Luna) poseen un potencial exploratorio; sin embargo, no han sido estudiados en detalle. (Peña, 2014)

Cuenca Valle Inferior Magdalena: El Valle Inferior del Magdalena (VIM) se subdivide en las subcuencas de Plato y San Jorge, separadas por el Arco de Magangué o Cicuco. La cuenca del Valle Inferior del Magdalena limita al Norte y al Oeste con el sistema de fallas de Romeral, al Sur y Sureste con la Cordillera Central y las rocas precretácicas de la Serranía de San Lucas y la Cordillera Central. Al Este con el sistema de fallas de Bucaramanga – Santa Marta. La gravedad API varía desde los 30 a los 52 °API.

Mioceno Temprano esquistos (Baja Porquero Fm) han sido reconocidos como la fuente principal de hidrocarburos en la cuenca. Estas Lutitas son de gran espesor, rico en materia orgánica y Kerosene tipo II. La Ciénaga de Oro tiene una formación superior del intervalo de regular a un rico contenido de materia orgánica tipo III, dentro de la ventana de petróleo en las zonas más profundas de la cuenca. Este intervalo puede ser considerado depositado durante un evento de máxima inundación.

Las rocas reservorio son una secuencia espesa de areniscas de origen fluvial a deltaico de la Formación Ciénaga de Oro, las cuales están intercaladas con rocas de grano fino (Lutitas) de origen fluvial a transicional marino que actúan como racas fuente, de acuerdo con los datos geoquímicos disponibles, y sellos locales para las acumulaciones. Areniscas y calizas del Oligoceno (Formación Ciénaga de Oro) son los principales embalses de la cuenca. El espesor bruto es de 300 ft, con una porosidad promedio de 15%. (Barrero, Pardo, Vargas, & Martínez, 2007)

Cuenca Valle Superior Magdalena. Se extiende desde la población de Pitalito en el Sur, hasta Honda en el norte. Esta cuenca produce diariamente en promedio cerca de 88.000 bpd, de los cuales 26.000 son crudos pesados, 53.000 son crudos medianos y 7.800 son crudos livianos. La gravedad API varía entre los 20 a 27 °API. En su roca generadora presenta deposición de lutitas y calizas con alto contenido en materia orgánica en las formaciones Tetuán, Bambuca y la Luna. El principal transportador de hidrocarburos son las areniscas de la formación Caballos y en menor escala las areniscas de la formación Monserrate. En la roca reservorio se presentan tres tipos de areniscas Caballos y Monserrate en el Cretácico y la formación Honda en el Mioceno. Existen también rocas calcáreas o calizas que presentan alto potencial como reservorio. (Peña, 2014)

Cuenca Caguán-Putumayo. La Cuenca Caguán-Putumayo abarca una región de 110 304 km² (al norte, Caguán y al sur, Putumayo), en el suroeste de Colombia (Figura 1). Limita al occidente con la Cordillera Oriental y al oriente con el Escudo de Guyana; al norte con la Serranía de la Macarena y al sur con el límite internacional con Ecuador. En esta cuenca se han reportado rezumaderos, descubrimientos de petróleo (365 MBP) y gas (305 GPCS), además de 30 campos petroleros, elementos que confirman la existencia de por lo menos un sistema petrolífero activo. Las rocas en la zona norte, con buenas características de generación de hidrocarburos, corresponden a los intervalos superior y medio del Grupo Macarena, de acuerdo con los datos recopilados en el pozo Uribe-1. En el sur, son de muy buenas características como generadora las formaciones Villeta y

Caballos según los análisis realizados. Las rocas del Cretácico, del sector de Florencia poseen también buenas cualidades para generar hidrocarburos.

Las areniscas cretácicas de la Formación Caballos son el principal reservorio en la cuenca, especialmente cuando se desarrollan fallas de un desplazamiento mayor a 61 metros. Las porosidades van desde 10% a 16% y permeabilidades promedio de 50 md. Reservorios secundarios son encontrados en las areniscas de la Formación Villeta y los conglomerados de la Formación Pepino. (Barrero, Pardo, Vargas, & Martinez, 2007)

Importancia de la estadística. Para tener un mayor entendimiento de la metodología planteada en el presente trabajo de investigación, se requiere introducir algunos conceptos estadísticos como la varianza, la cual se define como la dispersión de los datos de una muestra con respecto a la media aritmética (Serra, n.d.) , tal y como se describe en la ecuación 1. Por otra parte, el coeficiente de determinación (R^2) explica la varianza de la variable modelada por la regresión (según la ecuación 2), lo cual indica que un modelo con un R^2 superior al 70% logra aclarar el 70% de la varianza presente en dicho modelo.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2}{N - 1} \quad \dots (1)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{X}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2} \quad \dots (2)$$

Para estas ecuaciones, X_i representa el conjunto de datos observados en la base de datos, mientras que \hat{X}_i representa una estimación del valor de X según el modelo planteado, y \bar{x} se refiere a la media aritmética del conjunto de datos.

Por otra parte, en el modelado estadístico realizado para estimar concentraciones de Na^+ , Mg^{++} y Sr^{++} , fue posible trabajar con 8 variables independientes (iones restantes ya mencionados), no obstante, se realizó una discretización de estas para determinar la significancia de cada una dentro del modelo mediante el valor-P. El valor-P permite diferenciar las variables que son estadísticamente significativas en una regresión con un nivel de confianza del 95%, a las cuales se les asigna un valor igual o inferior a 0,05. Dicho valor permite realizar un ajuste en el coeficiente de determinación, de tal forma que no se incluyan variables no representativas dentro del modelo. Dicho esto, la presente investigación analiza principalmente los R^2 ajustados obtenidos para cada una de las correlaciones matemáticas.

Metodología

Se realizó una recopilación de AFQ's de aguas de formación provenientes de diferentes campos colombianos, se obtuvo información de aproximadamente 7873 AFQ's. Como se mencionó anteriormente, se trabajó solamente con aquellos AFQ's que contaban con la información completa de todos sus iones, los cuales fueron 1691 datos. Para dar un mejor tratamiento a estos, se buscó realizar agrupaciones con el fin de identificar patrones o tendencias, esto debido a que Colombia presenta una gran diversidad en su geología y estratigrafía. Por lo que se propuso categorizar dichos datos dependiendo de la cuenca petrolífera a la cual pertenecieran (según el campo), lo cual facilitó la obtención de correlaciones matemáticas.

Inicialmente, se buscaron correlaciones que tuvieran un R^2 ajustado superior al 80%, valor que se consideró aceptable para ajustar modelos de estimación de variables, sin embargo, dada la complejidad y numerosidad de los datos, se lograron obtener correlaciones con R^2 ajustados superiores al 70%, lo cual aún es considerado un valor aceptable que logra rescatar un número significativo de AFQ's que no cuentan con información de ciertos iones.

Esto se realizó a través del programa Statgraphics Centurion XVII, el cual es una potente herramienta de análisis de datos que combina una amplia gama de procedimientos analíticos con extraordinarios gráficos interactivos para proporcionar un entorno integrado de análisis que puede ser aplicado en cada una de las fases de un proyecto, desde los protocolos de gestión Six Sigma hasta los procesos de control de calidad. Este incluye funciones estadísticas avanzadas, capaces de proporcionar rigurosos análisis propios de los profesionales estadísticos más exigentes y experimentados, y al mismo tiempo ofrece un interface muy intuitivo, con funciones de asistencia exclusivas, de tal forma que proporciona la simplicidad suficiente para permitir a un analista inexperto realizar procedimientos complejos. (Statgraphics.Net, n.d.)

Dado el objetivo inicial, las primeras correlaciones matemáticas obtenidas por cuencas relacionan en su mayoría más de una variable independiente, lo cual ciertamente aumenta el valor del R^2 ajustado, sin embargo, se realizó un análisis gráfico de cada una de las variables independientes respecto a la variable dependiente de cada correlación, y se determinó cuál de estas presentaba el mayor R^2 ajustado, el cual tiene una mínima variación respecto al primer R^2 ajustado. En este sentido, se logró simplificar cada una de las correlaciones inicialmente obtenidas de tal forma que se pudiese realizar una estimación de las concentraciones de Na^+ , Mg^{++} y Sr^{++} en función de una única variable independiente con un coeficiente de determinación ajustado superior al 70% para todos los casos.

Finalmente, se corroboró la veracidad de las correlaciones obtenidas comparando el valor observado en la base de datos (teórico) respecto al valor predicho mediante la correlación (experimental), de tal forma que se pudiese identificar la cantidad de AFQ's que presentan un error relativo inferior al 10, 20 y 30% en el cálculo de los iones ya mencionados, con lo cual se logró estimar la concentración de alrededor 7000 iones de Na^+ , Mg^{++} y Sr^{++} presentes en 2315 AFQ's que no contaban con información completa de iones.

Resultados

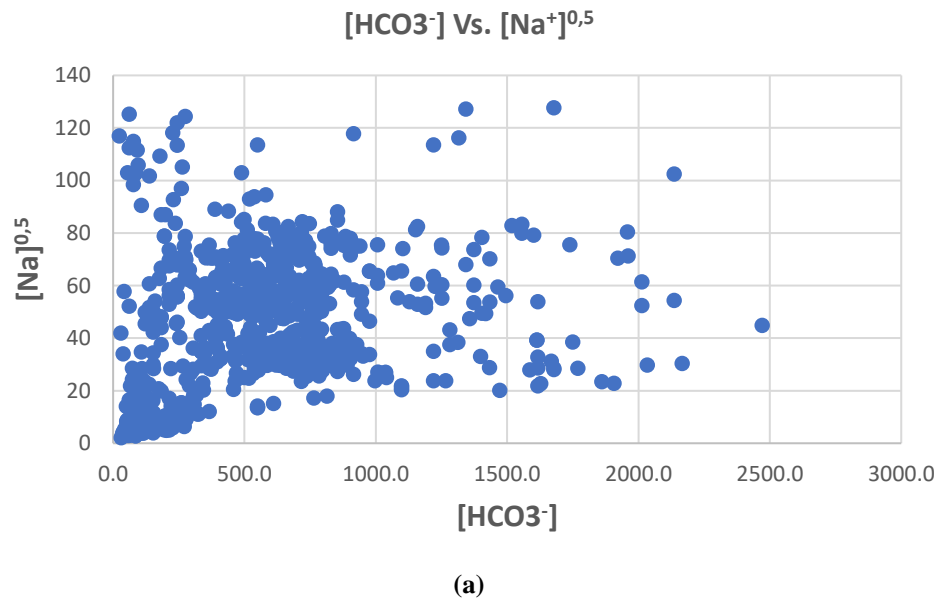
Cuenca de los Llanos Orientales. A continuación, se presentan los resultados de las correlaciones matemáticas para los iones Sodio (Na), Magnesio (Mg) y Estroncio (Sr).

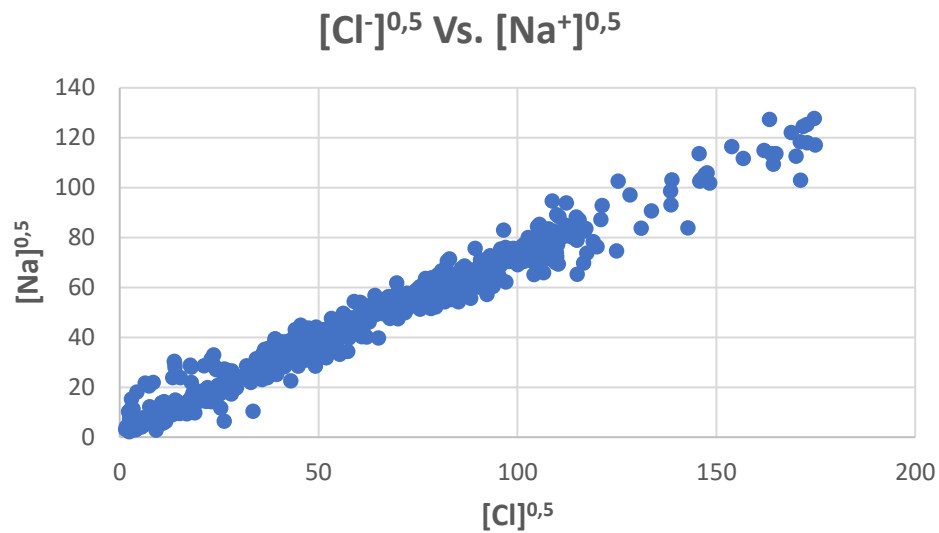
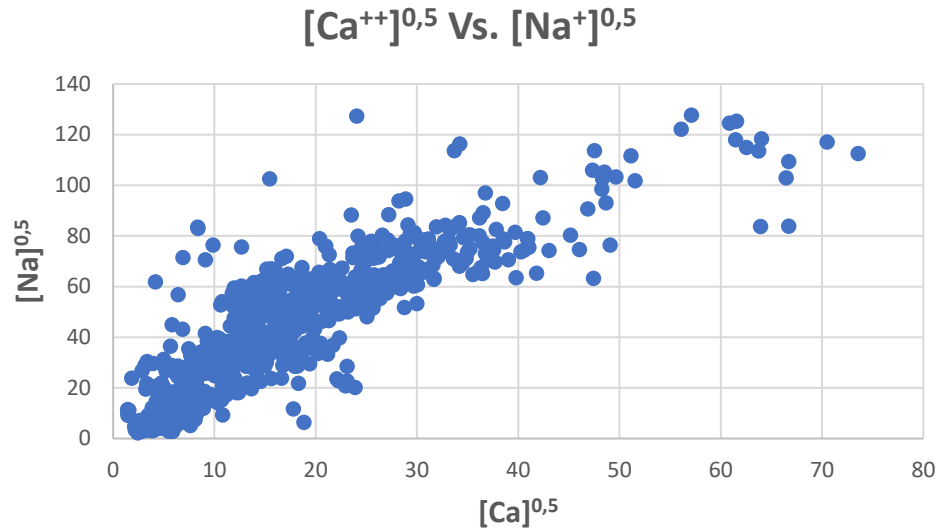
Sodio (Na). Para estimar la concentración de sodio, se obtuvo la ecuación 3 con un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 98,28% en función de las concentraciones de Calcio, Cloro y Bicarbonatos (en mg/L).

$$[Na^+]^{0,5} = 2,33266 + (0,00473349 * [HCO_3^-]) - (0,3003394 * [Ca^{++}]^{0,5}) + (0,759448 * [Cl^-]^{0,5}) \quad \dots(3)$$

Posteriormente, se realizaron gráficos de las variables independientes $[HCO_3^-]^{0,5}$, $[Ca^{++}]^{0,5}$ y $[Cl^-]^{0,5}$ respecto a la variable dependiente $[Na^+]^{0,5}$ presentados en la figura 1.

Figura 1. Análisis gráfico de las variables independientes respecto a la variable dependiente (a) $[HCO_3^-]$ Vs. $[Na^+]^{0,5}$ (b) $[Ca^{++}]^{0,5}$ Vs. $[Na^+]^{0,5}$ (c) $[Cl^-]^{0,5}$ Vs. $[Na^+]^{0,5}$



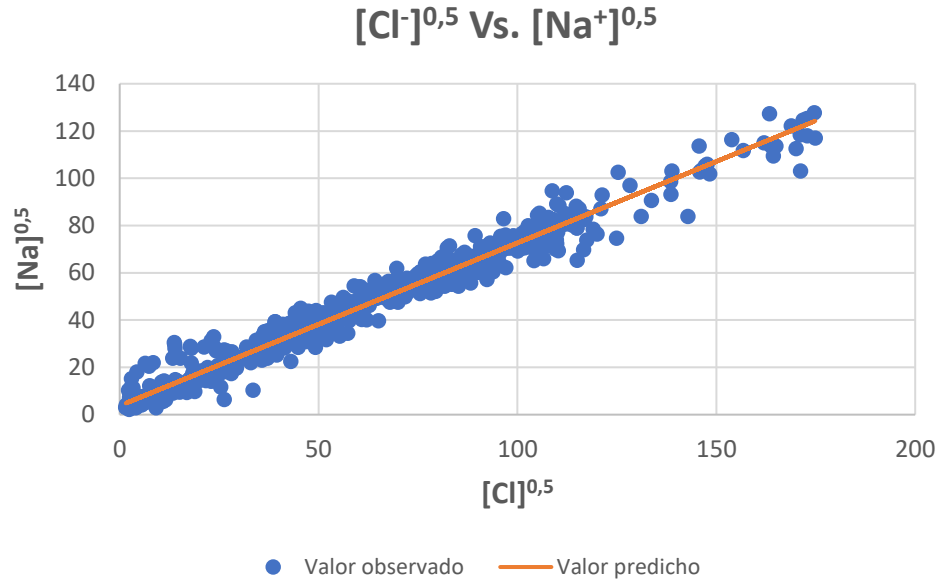


Como se observa, existe una clara relación lineal entre el Cloro y el Sodio, mientras que la relación con los iones Bicarbonato y Calcio no es tan evidente, razón por la cual, se buscó una correlación más simplificada que pudiese reemplazar la ecuación 3, la cual se presenta en la ecuación 4.

$$[Na^+]^{0,5} = (0,688948 * [Cl^-]^{0,5}) + 3,76187 \quad \dots(4)$$

Esta ecuación es igualmente válida a la ecuación 3, ya que presenta un R^2 bastante bueno de 97,34%. En este sentido, en la figura 2 se presentan los valores de $[Na^+]^{0,5}$ observados (según la base de datos) respecto a los valores de $[Na^+]^{0,5}$ predichos por la ecuación 4.

Figura 2. Valores de $[Na^+]^{0,5}$ teóricos respecto a los valores predichos.

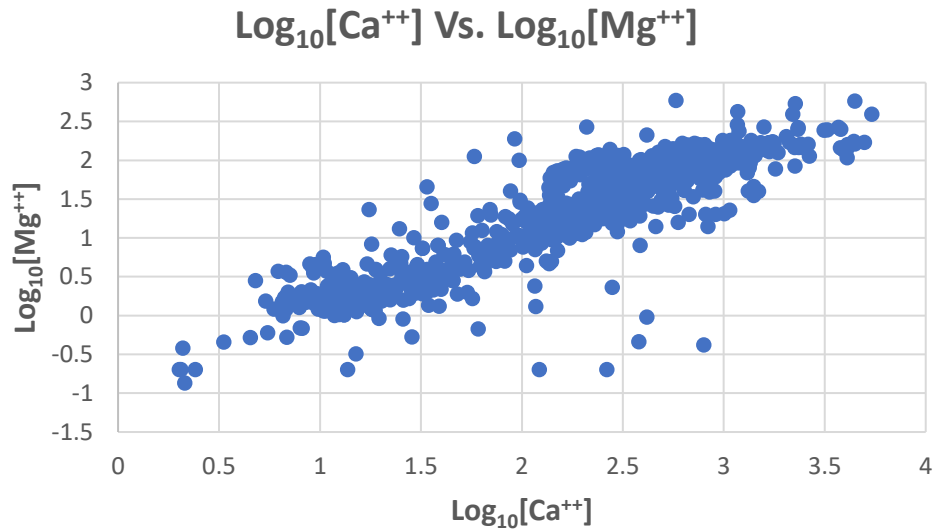


Magnesio. Para el caso del magnesio, se obtuvo la correlación descrita por la ecuación 5 en función de las concentraciones de Cloro y Calcio con un R^2 ajustado de 80,66%.

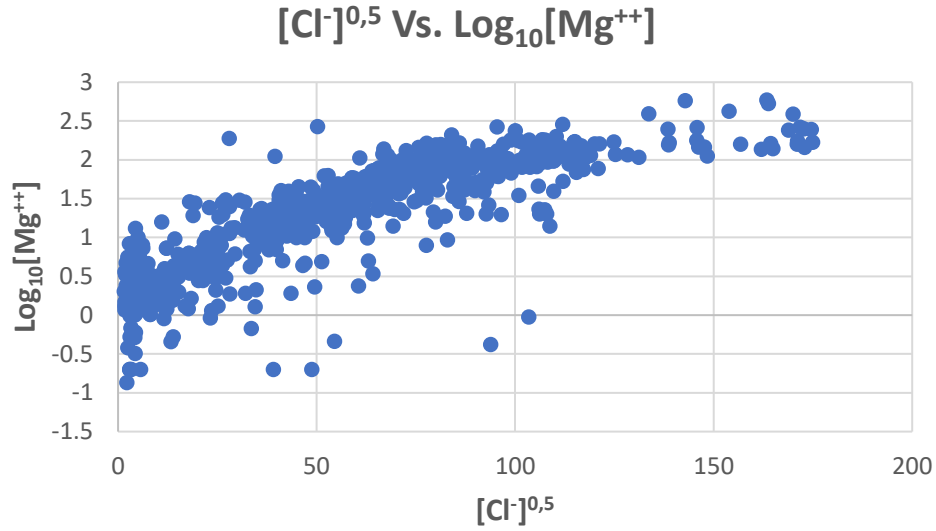
$$\log_{10}[Mg^{++}] = -0,433052 + (0,629937 * \log_{10}[Ca^{++}]) + (0,00577751 * [Cl^-]^{0,5}) \quad \dots(5)$$

En la figura 3 se evidencian los gráficos de las de las variables independientes $\log_{10}[Ca^{++}]$ y $[Cl^-]^{0,5}$ respecto a la variable dependiente $\log_{10}[Mg^{++}]$.

Figura 3. Análisis gráfico de las variables independientes $\log_{10}[Ca^{++}]$ y $[Cl^-]^{0,5}$ respecto a la variable dependiente $\log_{10}[Mg^{++}]$ (a) $\log_{10}[Ca^{++}]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$. (b) $[Cl^-]^{0,5}$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$.



(a)

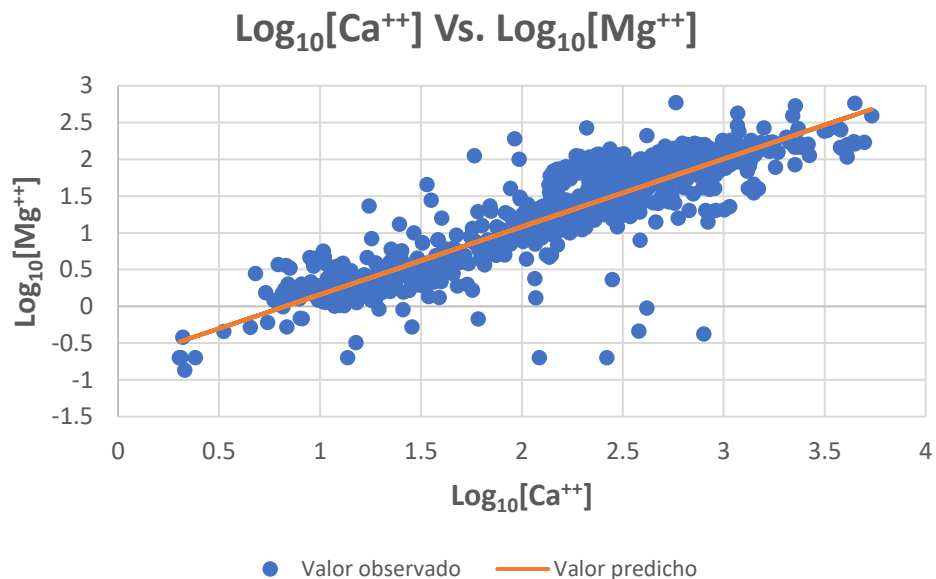


(b)

El gráfico de la figura 3(a) muestra una mayor correlación lineal entre el Magnesio y el Calcio, razón por la cual, se logra obtener la ecuación 6 con un R² ajustado de 78,8%, valor que no cambia significativamente al de la ecuación 5. La regresión múltiple correspondiente a esta ecuación se ilustra gráficamente en la figura 4.

$$\log_{10}[Mg^{++}] = (0,922497 * \log_{10}[Ca^{++}]) + 0,762774 \quad \dots(6)$$

Figura 4. Valores de Log₁₀[Mg⁺⁺] teóricos respecto a los valores predichos.



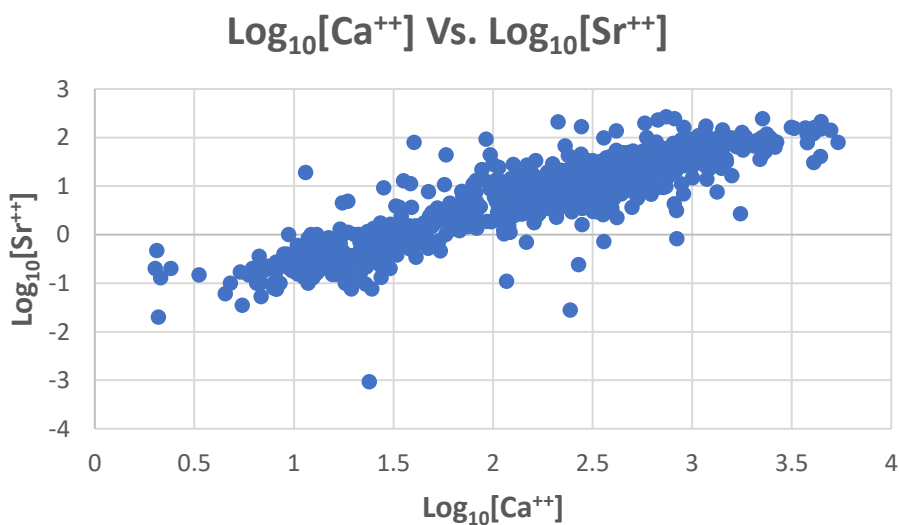
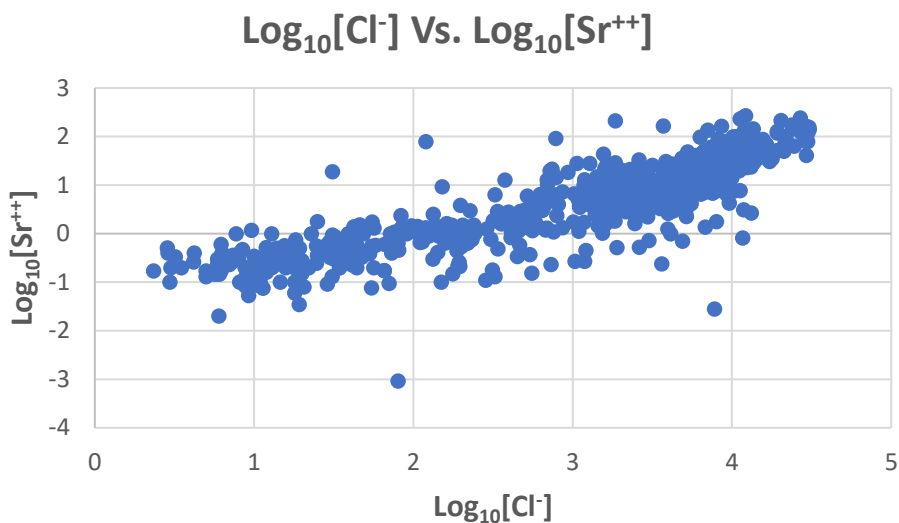
Estroncio. La correlación inicial obtenida para el Estroncio se muestra en la ecuación 7 en función de las concentraciones de Calcio y Cloro, la cual tiene un R² ajustado de 81,23%.

...(7)

$$\log_{10}[\text{Sr}^{++}] = -1,66411 + (0,78354 * \log_{10}[\text{Ca}^{++}]) + (0,230685 * \log_{10}[\text{Cl}^{-}])$$

En la figura 5 se observan los gráficos de las variables independientes $\text{Log}_{10}[\text{Cl}^{-}]$ y $\text{Log}_{10}[\text{Ca}^{++}]$ respecto a la variable dependiente $\text{Log}_{10}[\text{Sr}^{++}]$.

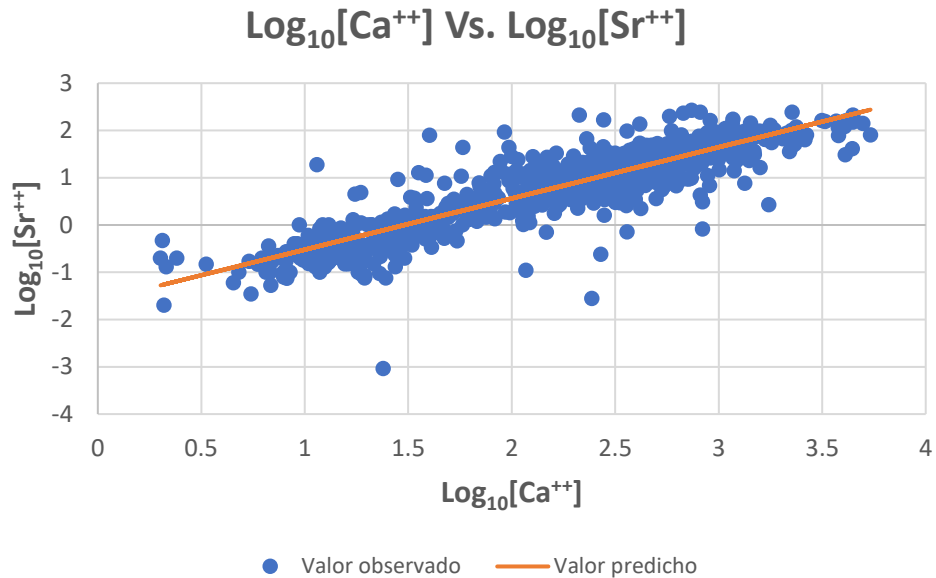
Figura 5. Análisis gráfico de las variables independientes $\text{Log}_{10}[\text{Cl}^{-}]$ y $\text{Log}_{10}[\text{Ca}^{++}]$ respecto a la variable dependiente $\text{Log}_{10}[\text{Sr}^{++}]$.



Se observa una mayor correlación entre el Estroncio y el Calcio, con lo cual se plantea la ecuación 8 como alternativa para estimar la concentración del estroncio con un R^2 de 80,05%. Así mismo, el valor observado respecto al predicho para la concentración de estroncio se presenta en la figura 6.

$$\log_{10}[Sr^{++}] = -1,60474 + (1,08302 * \log_{10}[Ca^{++}]) \quad \dots(8)$$

Figura 6. Valores de $\log_{10}[Sr^{++}]$ teóricos respecto a los valores predichos.

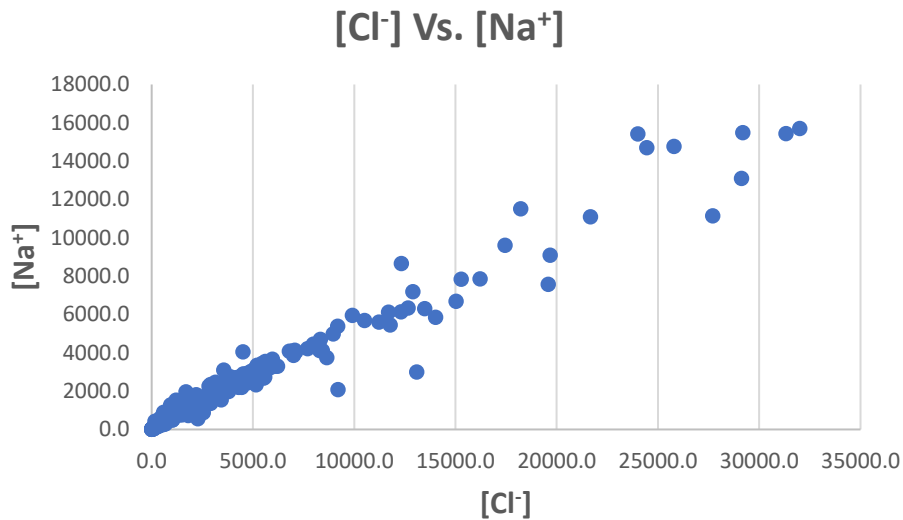
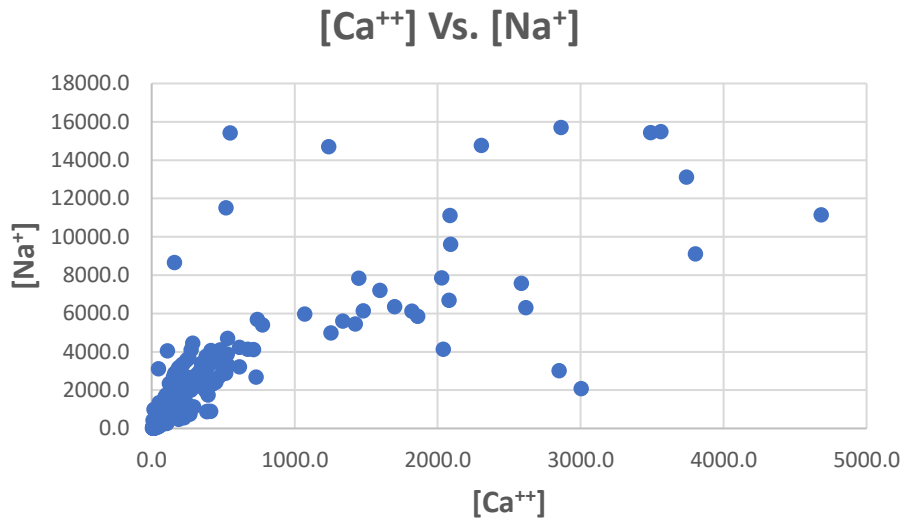


Cuenca del Valle Superior del Magdalena. El procedimiento realizado para los análisis fisicoquímicos de aguas de campos pertenecientes a la cuenca del Valle Superior del Magdalena fue el mismo que para la cuenca de los Llanos Orientales.

Sodio. Inicialmente, se obtuvo una correlación matemática utilizando la herramienta anteriormente mencionada (Stratgraphics Centurion XVII) para estimar la concentración de Sodio en función de las concentraciones de Calcio y Cloro con un R^2 ajustado de 98,19%, la cual se presenta en la ecuación 9. De la misma forma, los gráficos de $[Ca^{++}]$ Vs. $[Na^+]$ y $[Cl^-]$ Vs. $[Na^+]$ se presentan en la figura 7.

$$[Na^+] = 160,937 - (1,32509 * [Ca^{++}]) + (0,64378 * [Cl^-]) \quad \dots(9)$$

Figura 7. Análisis grafico de las variables independientes $[Ca^{++}]$ y $[Cl^-]$ respecto a la variable dependiente $[Na^+]$. (a) $[Ca^{++}]$ Vs. $[Na^+]$ (b) $[Cl^-]$ Vs. $[Na^+]$

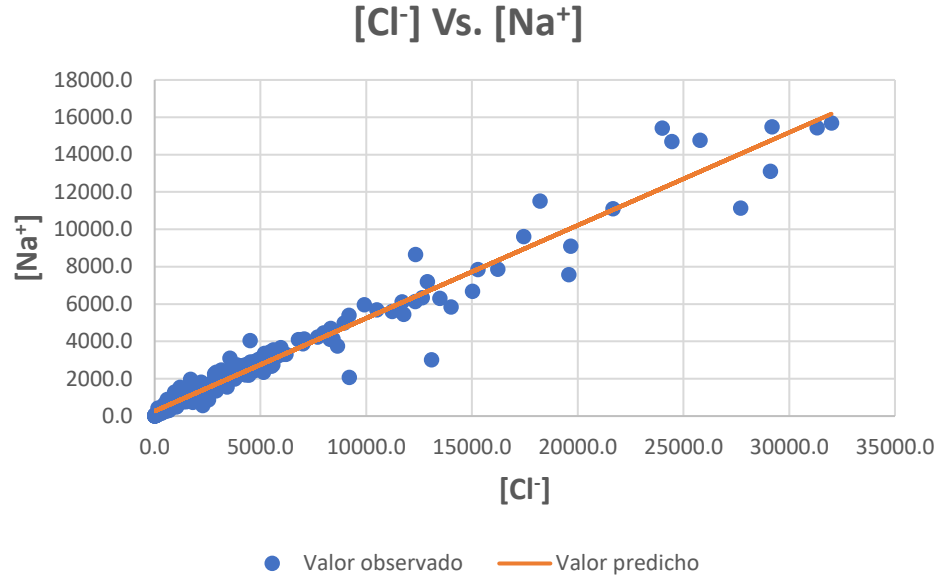


Se observa una mejor relación lineal entre el Cloro y el Sodio, parámetros que son nuevamente correlacionados para obtener la ecuación 10 con un R^2 ajustado de 95,58%, valor que no varía significativamente respecto al de la ecuación 9.

$$[Na^+] = 262,894 + (0,497532 * [Cl^-]) \quad \dots(10)$$

Esta ecuación se puede representar de forma gráfica (figura 8) como un valor predicho respecto al valor observado de la base de datos.

Figura 8. Valores teóricos de $[Na^+]$ respecto a los valores predichos.

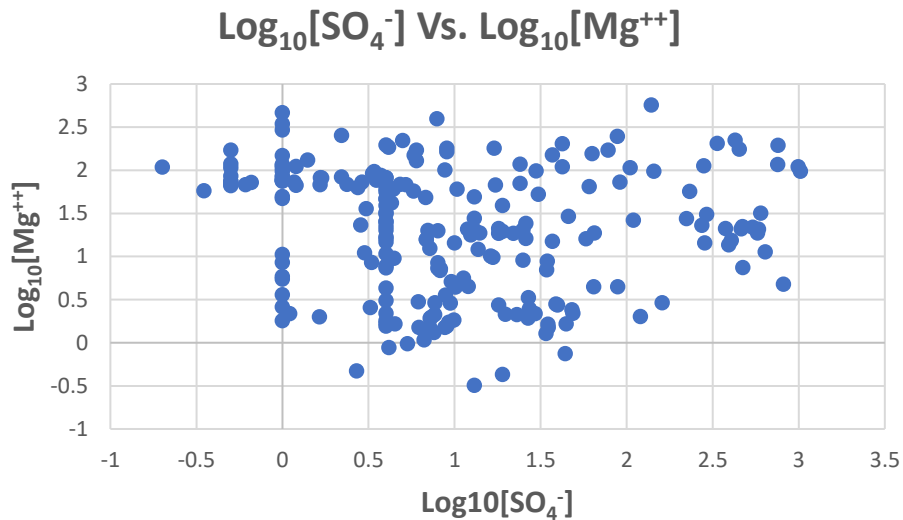


Magnesio. La primera correlación que logra estimar la concentración de Magnesio con un R^2 ajustado del 75,95% se presenta en la ecuación 11 en función de las concentraciones de Sulfatos, Calcio y Cloruros.

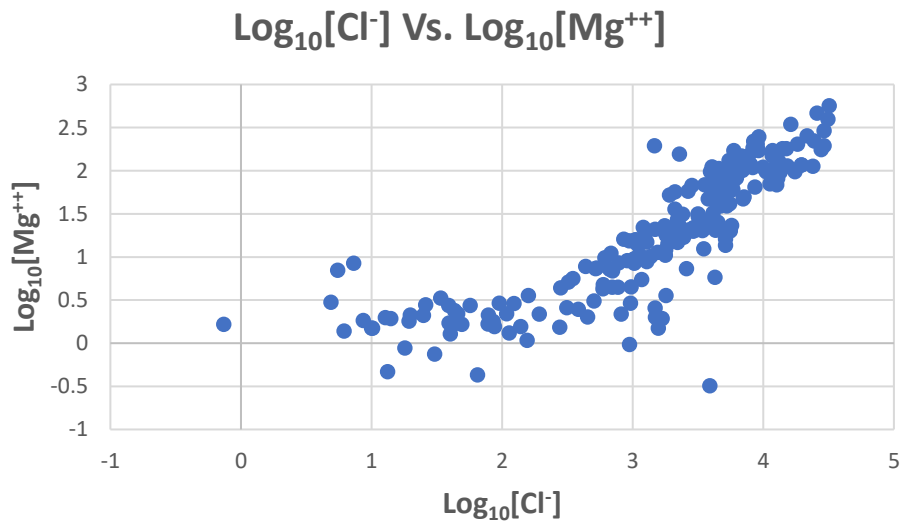
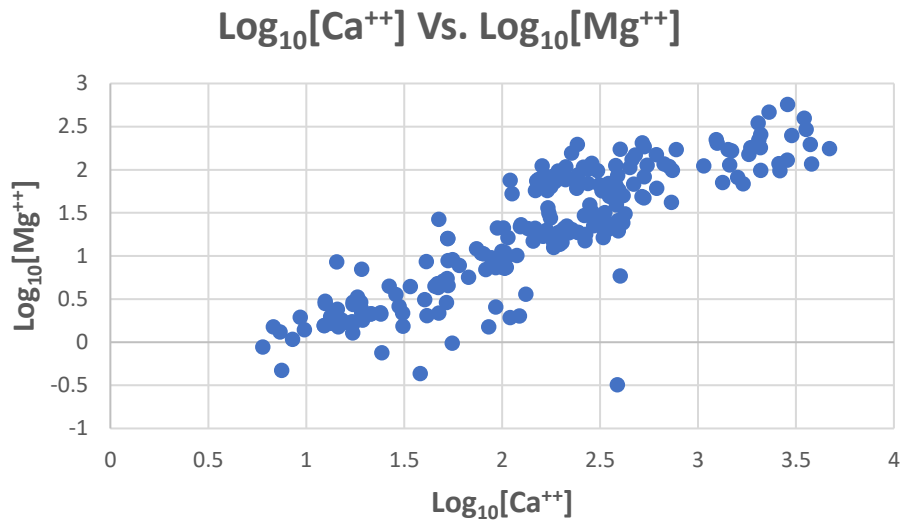
$$\log_{10}[Mg^{++}] = -0,843856 - (0,0732694 * \log_{10}[SO_4^-]) + (0,586881 * \log_{10}[Ca^{++}]) + (0,298024 * \log_{10}[Cl^-]) \quad \dots(11)$$

Los gráficos de $\log_{10}[SO_4^-]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$, $\log_{10}[Ca^{++}]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$ y $\log_{10}[Cl^-]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$ se presentan en la figura 9.

Figura 9. Análisis gráfico de las variables independientes $\log_{10}[SO_4^-]$, $\log_{10}[Ca^{++}]$ y $\log_{10}[Cl^-]$ respecto a la variable dependiente $\log_{10}[Mg^{++}]$. (a) $\log_{10}[SO_4^-]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$ (b) $\log_{10}[Ca^{++}]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$ (c) $\log_{10}[Cl^-]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$.



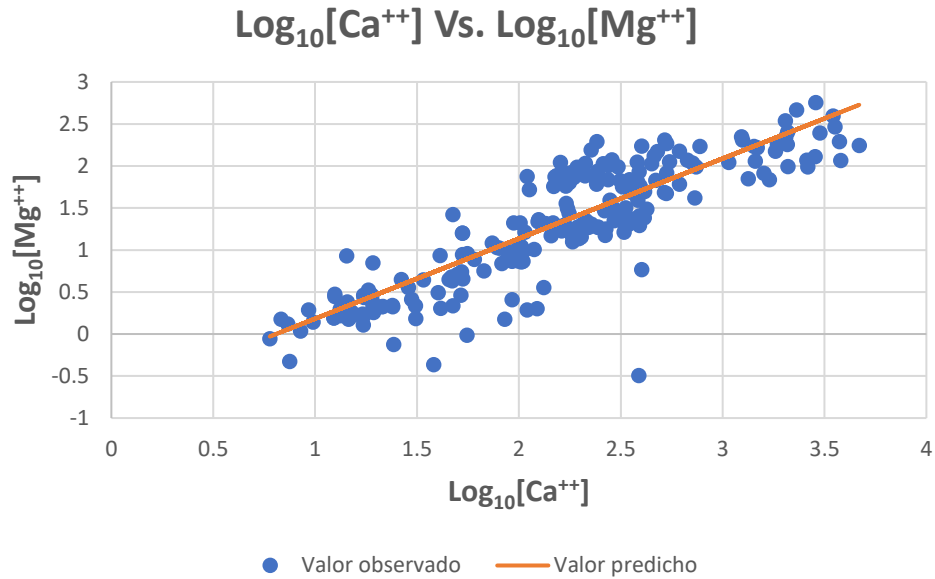
(a)



Como se observa, la concentración de Sulfatos no aporta a la estimación del Magnesio, razón por la cual se descarta para la correlación. Por otra parte, el gráfico de la figura 9 (b) presenta el mayor R^2 ajustado (72,24%) de los tres, el cual se acerca más al de la ecuación 11. La ecuación 12 presenta la correlación del Magnesio en función del Calcio y se ilustra en la figura 10.

$$\log_{10}[Mg^{++}] = -0,770227 + (0,952877 * \log_{10}[Ca^{++}]) \quad \dots(12)$$

Figura 10. Valores teóricos de Log₁₀[Mg⁺⁺] respecto a los valores predichos.

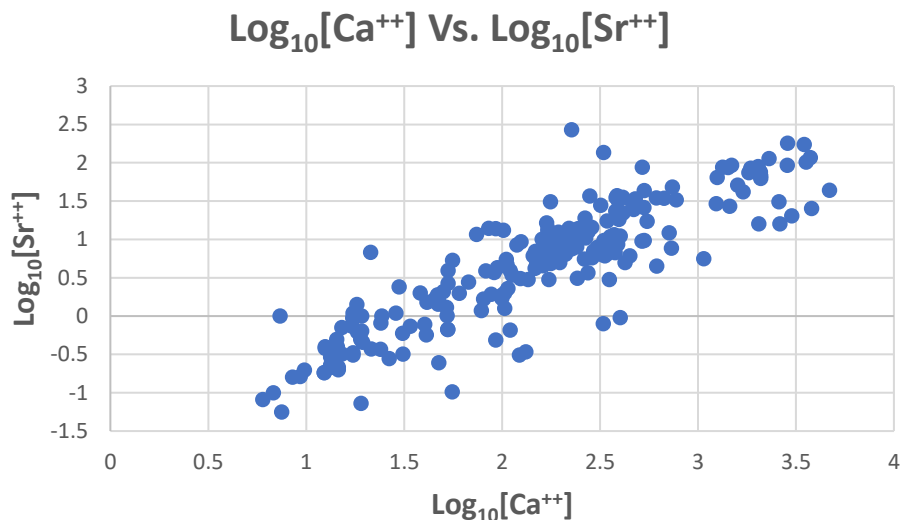


Estroncio. La correlación inicial obtenida para el Estroncio se presenta en la ecuación 13 con un R² ajustado de 79,03% en función del Calcio y el Bario.

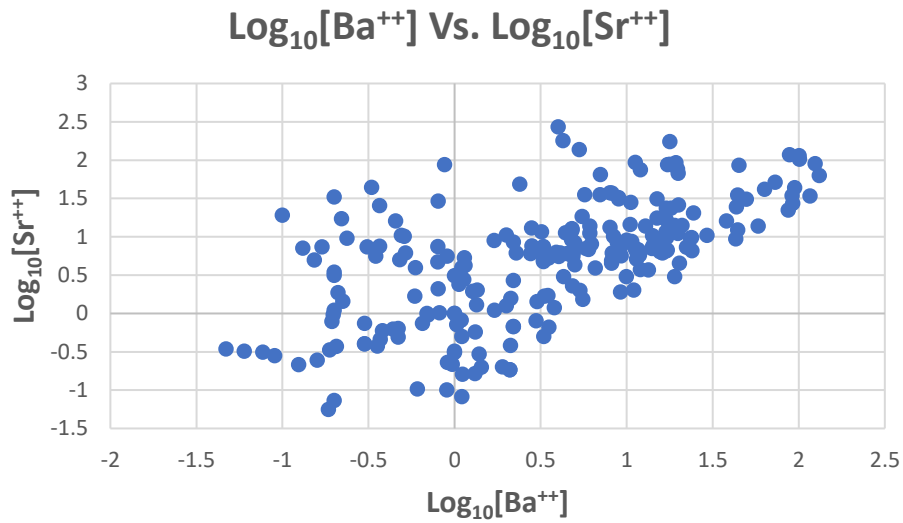
$$\log_{10}[\text{Sr}^{++}] = -1,41136 + (0,913416 * \log_{10}[\text{Ca}^{++}]) + (0,186459 * \log_{10}[\text{Ba}^{++}]) \quad \dots(13)$$

Los gráficos de Log₁₀[Ca⁺⁺] Vs. Log₁₀[Sr⁺⁺] y Log₁₀[Ba⁺⁺] Vs. Log₁₀[Sr⁺⁺] se presentan en la figura 11.

Figura 11. Análisis gráfico de las variables independientes Log₁₀[Ca⁺⁺] y Log₁₀[Ba⁺⁺] respecto a la variable independiente Log₁₀[Sr⁺⁺]. (a) Log₁₀[Ca⁺⁺] Vs. Log₁₀[Sr⁺⁺] (b) Log₁₀[Ba⁺⁺] Vs. Log₁₀[Sr⁺⁺].



(a)

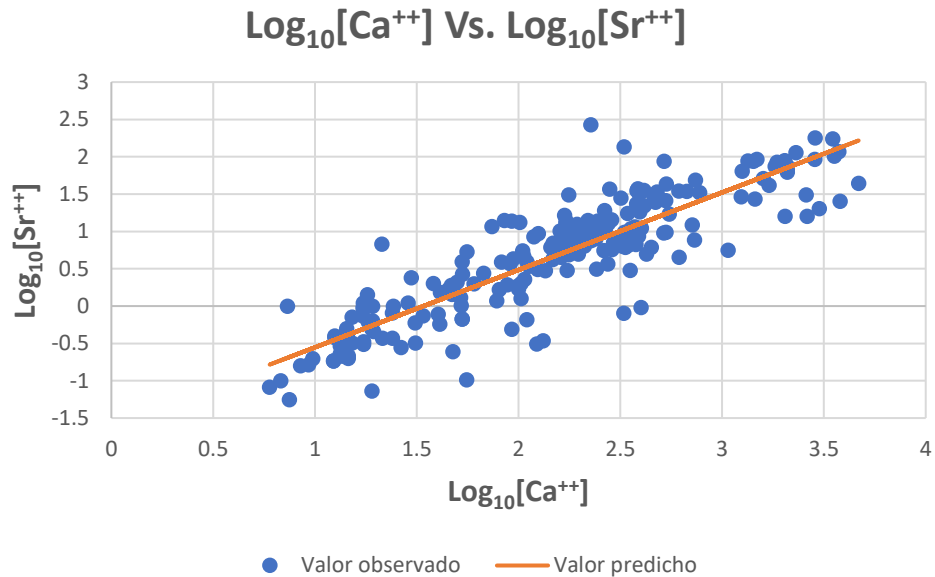


(b)

Se presenta una mayor correlación de la concentración de estroncio en función de la concentración de calcio con un R² ajustado de 76,3% tal y como se observa en la ecuación 14 y figura 12.

$$\log_{10}[Sr^{++}] = -1,59055 + (1,03743 * \log_{10}[Ca^{++}]) \quad \dots(14)$$

Figura 12. Valores de teóricos de Log₁₀[Sr⁺⁺] respecto a los valores predichos.



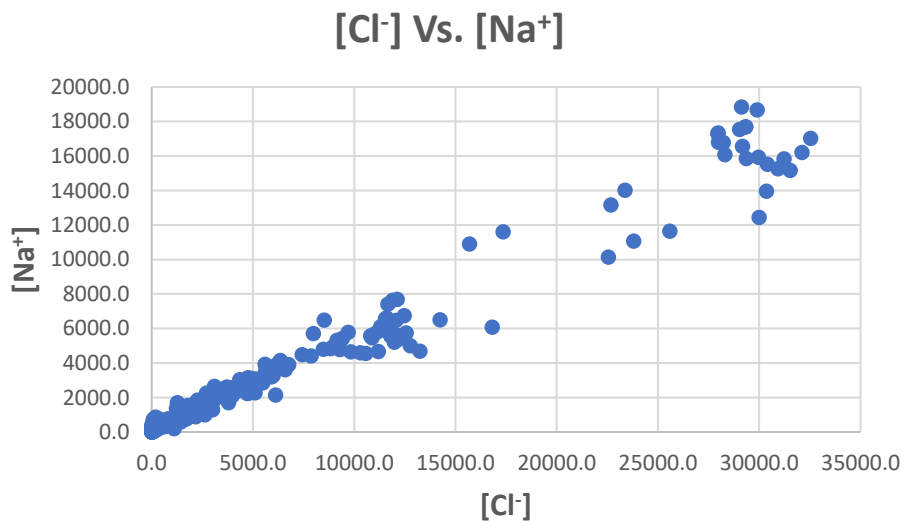
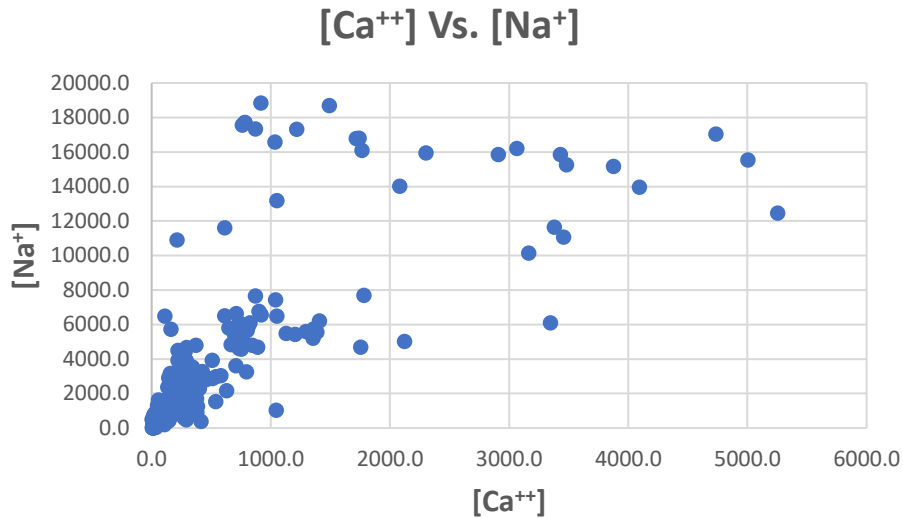
Valle Inferior-Medio del Magdalena. Dado que la base de datos depurada cuenta solamente con pocos análisis fisicoquímicos de aguas pertenecientes a la cuenca del Valle Inferior del Magdalena, se decidió trabajarla en conjunto con las que hacen parte de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, esto teniendo en cuenta que su estructura geología presenta similitudes.

Sodio. La correlación inicial obtenida para el Sodio se encuentra en función de las concentraciones de Calcio y Cloruros con un R^2 ajustado del 98,75% según la ecuación 15.

$$[Na^+] = 162,303 - (1,21239 * [Ca^{++}]) + (0,637973 * [Cl^-]) \quad \dots(15)$$

Los gráficos de $[Ca^{++}]$ Vs. $[Na^+]$ y $[Cl^-]$ Vs. $[Na^+]$ se presentan en la figura 13.

Figura 13. Análisis gráfico de las variables independientes $[Ca^{++}]$ y $[Cl^-]$ respecto a la variable dependiente $[Na^+]$ (a) $[Ca^{++}]$ Vs. $[Na^+]$ (b) $[Cl^-]$ Vs. $[Na^+]$.

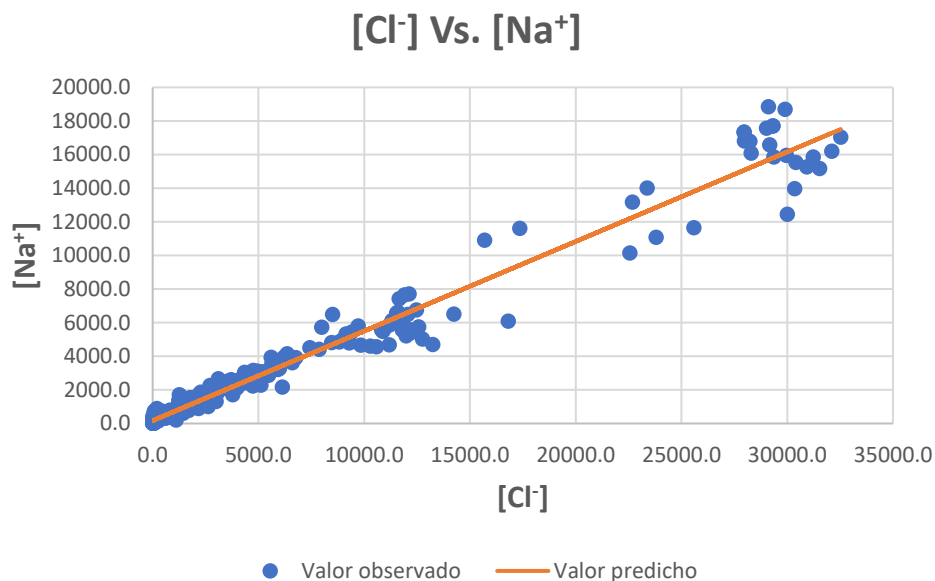


Evidentemente, se observa una mayor correlación del sodio con el cloro, parámetros que se pueden modelar excluyendo al calcio según la ecuación 16 con un R^2 ajustado de 97,12%.

$$[Na^+] = 171,832 + (0,532859 * [Cl^-]) \quad \dots(16)$$

Por su parte, el gráfico de valor observado Vs. el valor predicho se presenta en la figura 14.

Figura 14. Valores de $[Na^+]$ teóricos respecto a los valores predichos.

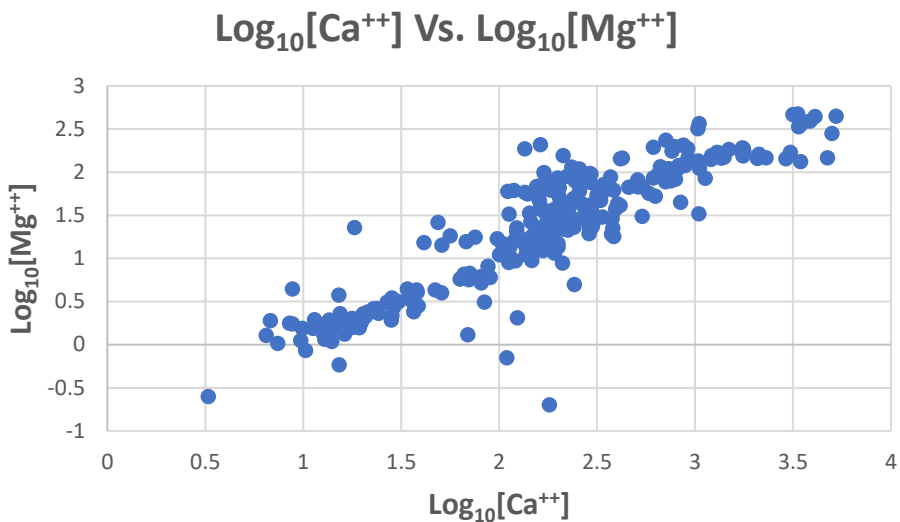


Magnesio. La correlación inicial obtenida para el Magnesio se encuentra en función del Calcio, Hierro y Cloruros, con un R^2 ajustado de 84,9716% según la ecuación 17.

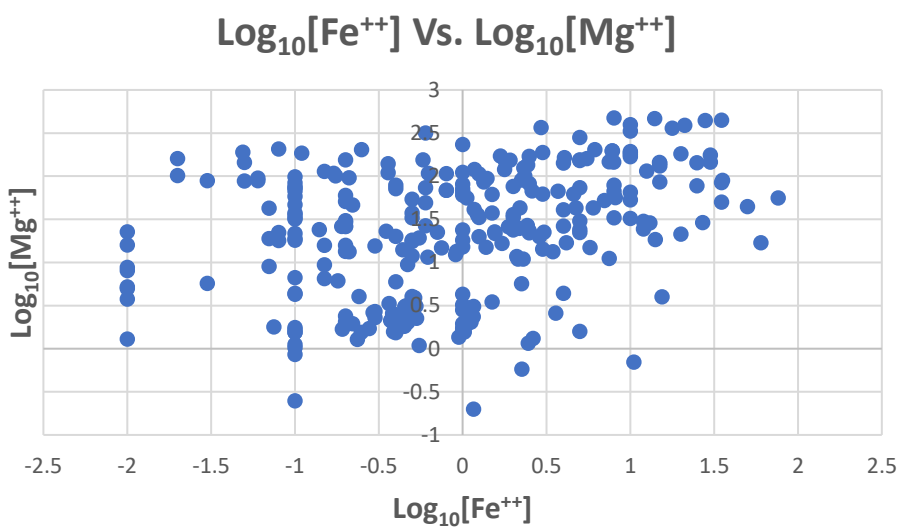
$$\log_{10}[Mg^{++}] = -1,01183 + (0,576749 * \log_{10}[Ca^{++}]) - (0,055124 * \log_{10}[Fe^{++}]) + (0,340264 * \log_{10}[Cl^-]) \quad \dots(17)$$

Los gráficos de $\log_{10}[Ca^{++}]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$, $\log_{10}[Fe^{++}]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$ y $\log_{10}[Cl^-]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$ se presentan en la figura 15.

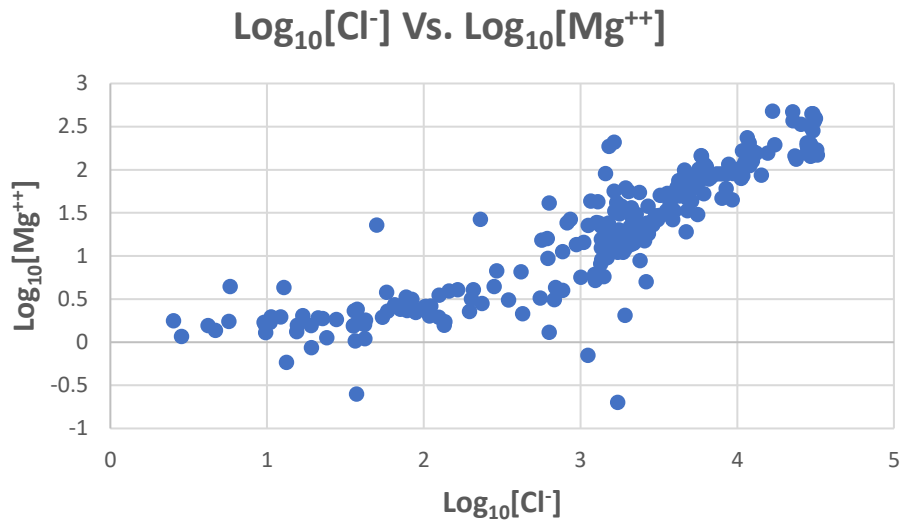
Figura 15. Análisis gráfico de las variables independientes $\log_{10}[Ca^{++}]$, $\log_{10}[Fe^{++}]$ y $\log_{10}[Cl^-]$ respecto a la variable dependiente $\log_{10}[Mg^{++}]$. (a) $\log_{10}[Ca^{++}]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$ (b) $\log_{10}[Fe^{++}]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$ (c) $\log_{10}[Cl^-]$ Vs. $\log_{10}[Mg^{++}]$.



(a)



(b)

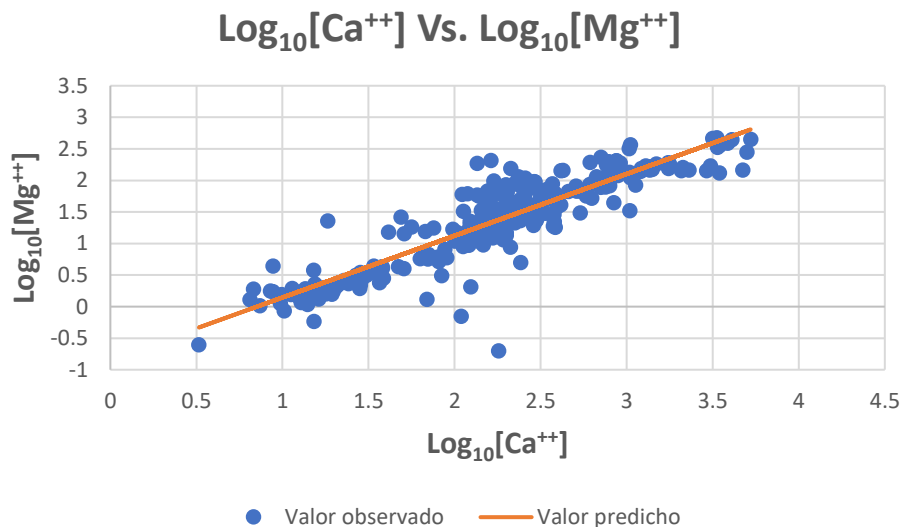


(c)

Existen correlaciones bastante fuertes del Magnesio con el Calcio y los Cloruros, sin embargo, entre el Magnesio y el Calcio se presenta la mayor R^2 ajustada (81,05%), la cual representa la ecuación 18. Así mismo, la gráfica de valor predicho para el Magnesio respecto al valor observado se presenta en la figura 16.

$$\log_{10}[Mg^{++}] = -0,834024 + (0,978691 * \log_{10}[Ca^{++}]) \quad \dots(18)$$

Figura 16. Valores de Log₁₀[Mg⁺⁺] teóricos respecto a los valores predichos.

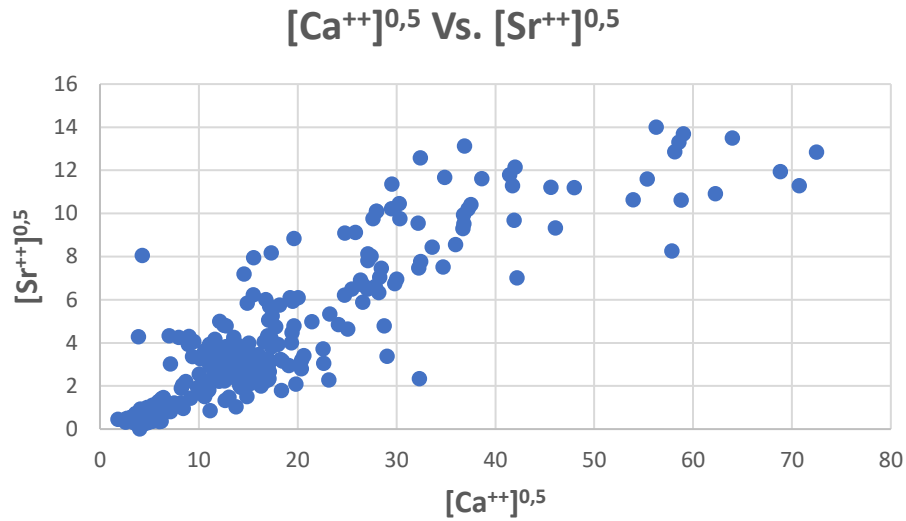


Estroncio. La correlación inicial obtenida para el Estroncio se planteó en función de las concentraciones de Calcio y Cloruros con un R^2 ajustado de 84,09% según la ecuación 19. Así mismo, los gráficos de $[Ca^{++}]^{0,5}$ Vs. $[Sr^{++}]^{0,5}$ y $[Cl^-]^{0,5}$ Vs. $[Sr^{++}]^{0,5}$ se presentan en la figura 17.

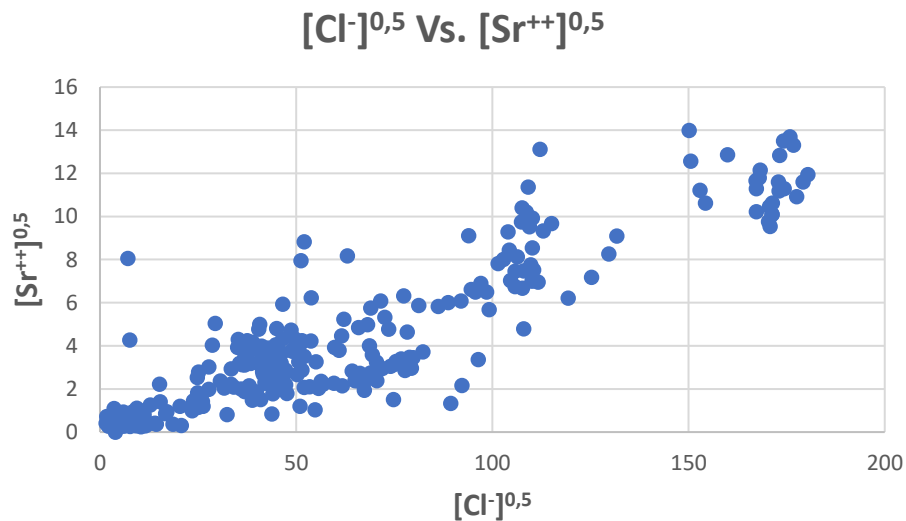
...(19)

$$[Sr^{++}]^{0,5} = -0,0522341 + (0,102281 * [Ca^{++}]^{0,5}) + (0,0391745 * [Cl^{-}]^{0,5})$$

Figura 17. Análisis grafico de las variables independientes $[Ca^{++}]^{0,5}$ y $[Cl^{-}]^{0,5}$ respecto a la variable dependiente $[Sr^{++}]^{0,5}$. (a) $[Ca^{++}]^{0,5}$ Vs. $[Sr^{++}]^{0,5}$ (b) $[Cl^{-}]^{0,5}$ Vs. $[Sr^{++}]^{0,5}$ (a) $[Ca^{++}]^{0,5}$ Vs. $[Sr^{++}]^{0,5}$ (b) $[Cl^{-}]^{0,5}$ Vs. $[Sr^{++}]^{0,5}$.



(a)

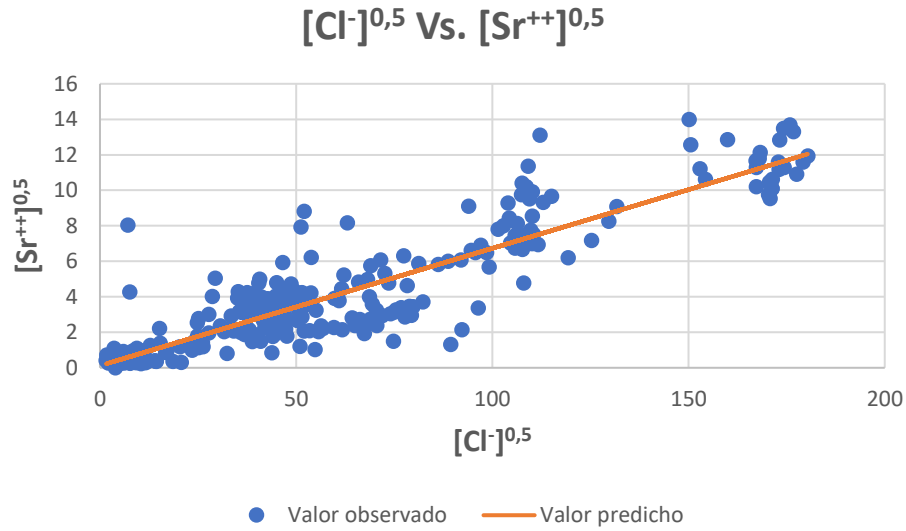


(b)

Los R^2 ajustados de la figura 17 (a) y (b) son 78,62% y 80,90%, respectivamente, por lo que se escoge la correlación entre el Estroncio y los Cloruros, la cual se modela según la ecuación 20.

$$[Sr^{++}]^{0,5} = 0,121204 + (0,0660985 * [Cl^{-}]^{0,5}) \quad \dots(20)$$

La gráfica del valor predicho de Estroncio respecto al valor observado en la base de datos se presenta en la figura 18.

Figura 18. Valores de $[Sr^{++}]^{0,5}$ teóricos respecto a los valores predichos.

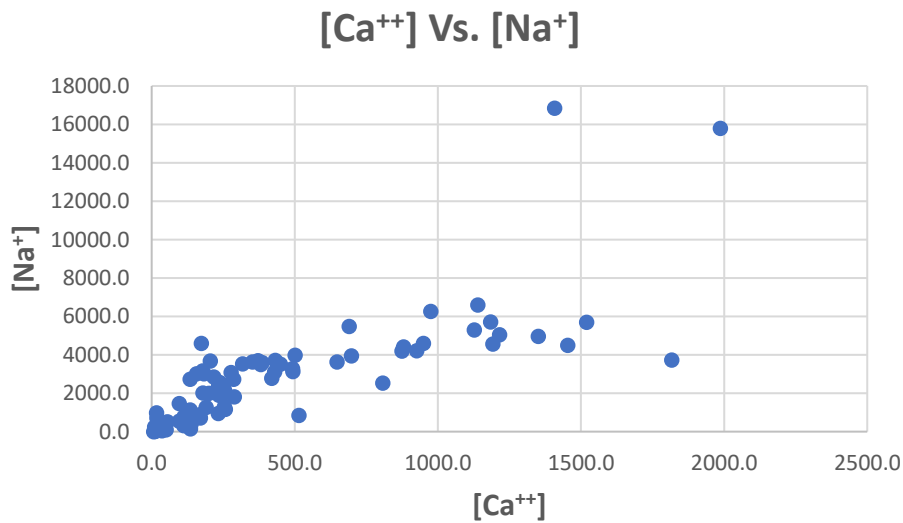
Cuenca del Caguán-Putumayo. Por último, se tiene el mismo procedimiento para la Cuenca del Caguán-Putumayo.

Sodio. La correlación inicial obtenida para estimar la concentración de Sodio se encuentra en función de Calcio, Cloruros y Bicarbonatos con un R^2 ajustado de 98,31% según la ecuación 21.

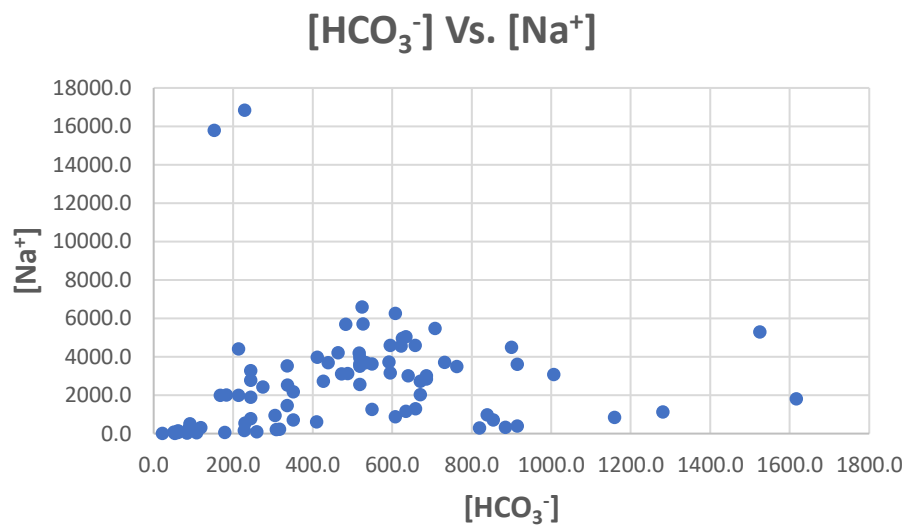
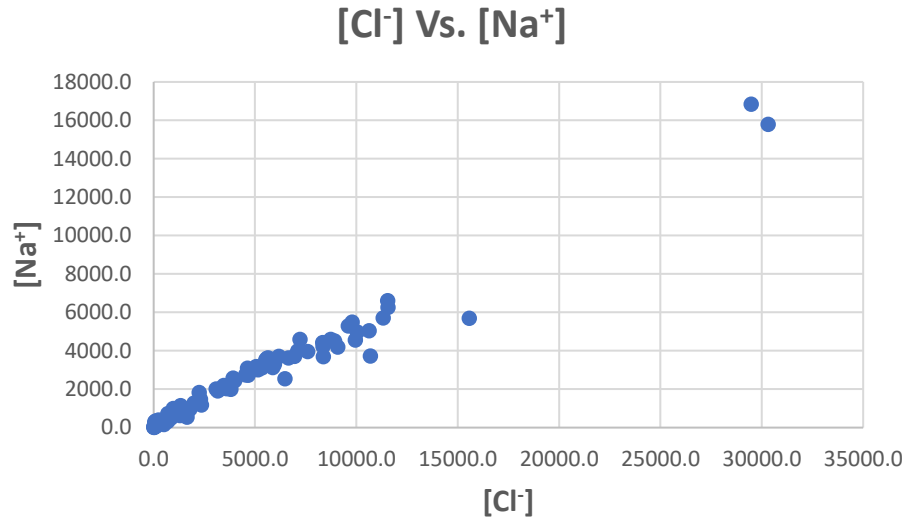
$$[Na^+] = 2,42636 - (1,44071 * [Ca^{++}]) + (0,61654 * [Cl^-]) + (0,52549 * [HCO_3^-]) \quad \dots(21)$$

Los gráficos de $[Ca^{++}]$ Vs. $[Na^+]$, $[Cl^-]$ Vs. $[Na^+]$ y $[HCO_3^-]$ Vs. $[Na^+]$ se presentan en la figura 19.

Figura 19. Análisis grafico de las variables independientes $[Ca^{++}]$, $[Cl^-]$ y $[HCO_3^-]$ respecto a la variable dependiente $[Na^+]$ (a) $[Ca^{++}]$ Vs. $[Na^+]$ (b) $[Cl^-]$ Vs. $[Na^+]$ (c) $[HCO_3^-]$ Vs. $[Na^+]$.



(a)

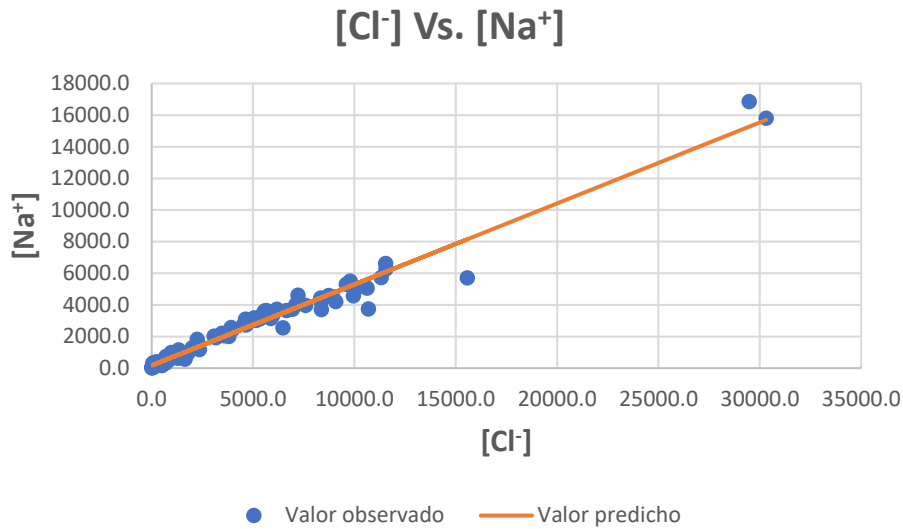


Existe una mayor correlación lineal del Sodio con los Cloruros, la cual es definida mediante la ecuación 22 con un R^2 ajustado de 96,81%.

$$[Na^+] = 171,261 + (0,512194 * [Cl^-]) \quad \dots(22)$$

El valor de Sodio observado respecto al valor predicho por la correlación en función de Cloruros se presenta en el gráfico de la figura 20.

Figura 20. Valores de $[Na^+]$ teóricos respecto a los valores predichos.

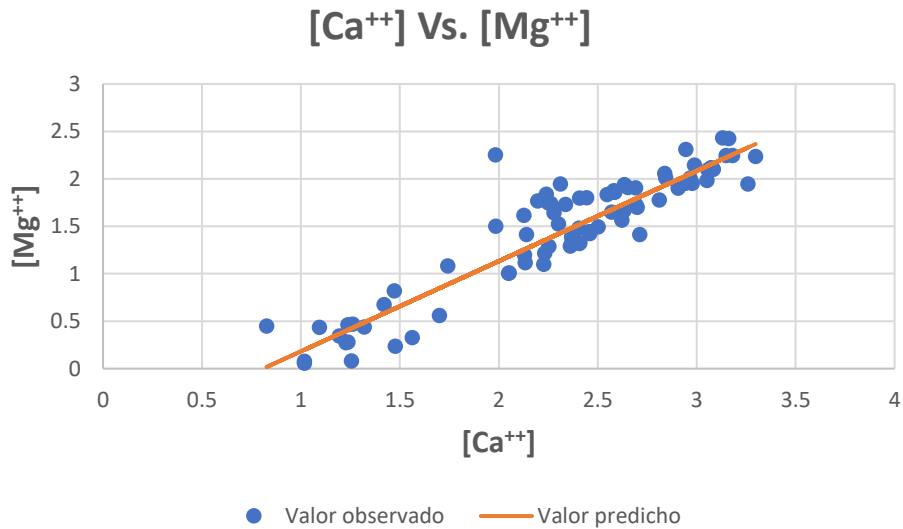


Magnesio. La correlación matemática obtenida inicialmente para el Magnesio se encuentra en función del Calcio según la ecuación 23 con un R² ajustado de 76,45%.

$$\log_{10}[Mg^{++}] = -0,769107 + (0,950923 * \log_{10}[Ca^{++}]) \quad \dots(23)$$

El gráfico del valor de Magnesio observado respecto al valor predicho se presenta en la figura 21.

Figura 21. Valores de [Mg⁺⁺] teóricos respecto a los valores predichos.

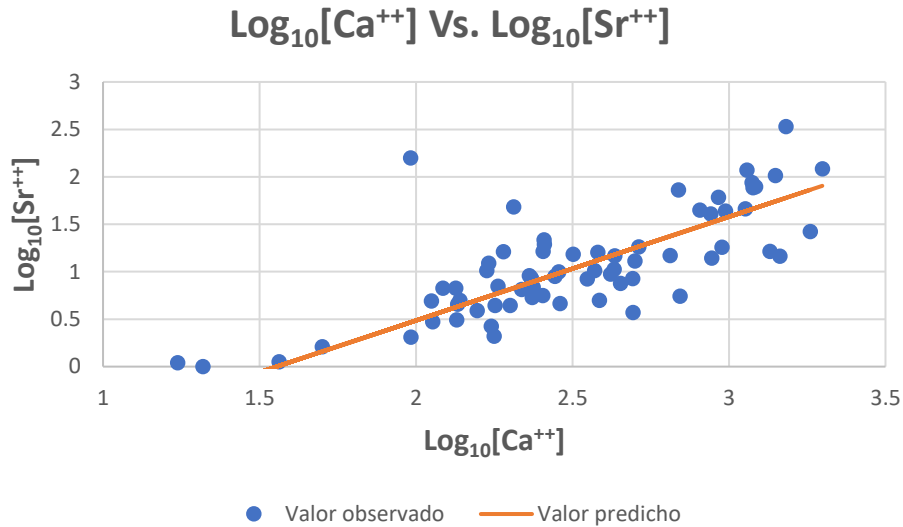


Estroncio. La correlación obtenida para el Estroncio se presenta en la ecuación 24 con un R² ajustado de 77,85% en función de la concentración de Calcio.

$$\log_{10}[Sr^{++}] = -1,70009 + (1,0931 * \log_{10}[Ca^{++}]) \quad \dots(24)$$

El gráfico del valor observado respecto al valor predicho para el Magnesio se ilustra en la **Figura 22**.

Figura 22. Valores de Log₁₀[Sr⁺⁺] teóricos respecto a los valores predichos.



En la tabla 2 se observa un resumen de cada una de las correlaciones halladas por cuentas tanto con una o varias variables independientes para cada uno de los iones junto con su coeficiente de determinación (R^2).

Conclusiones

Como ya se ha mencionado, la presente investigación permitió estimar alrededor de 7000 datos presentes en 2315 AFQ's, lo cual es una cifra significativa de análisis recuperados a partir de un modelado estadístico. Esto ha permitido ahorrar insumos en la determinación de los ya mencionados iones.

Por otra parte, se logró determinar que el análisis estadístico realizado por cuencas petrolíferas fue bastante acertado a la hora de estimar concentraciones, ya que fue posible determinar tendencias y patrones de correlación de Na^+ , Mg^{++} y Sr^{++} principalmente con los iones de Calcio y Cloruros. De esta forma, no es necesario recurrir a la técnica de absorción atómica para determinación de los iones metálicos mencionados.

Finalmente, la estimación de concentraciones de iones metálicos mediante correlaciones matemáticas presentó en su gran mayoría un error relativo inferior al 20% entre el valor observado y el valor predicho, con lo cual se corrobora la veracidad de las correlaciones y permite al lector tener una confiabilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 2. Correlaciones por cuencas para los iones Na^+ , Mg^{++} y Sr^{++} .

CUENCA	ION	OPCIÓN	CORRELACIÓN	R-cuadrada ajustado
LLANOS ORIENTALES	Na	ECUACIÓN 3	$(\text{Na [mg/L]})^{0.5} = 2.33266 + (0.00473349 * (\text{HCO}_3 \text{ [mg/L]}) - (0.3003394 * (\text{Ca [mg/L]})^{0.5}) + (0.759448 * (\text{Cl [mg/L]})^{0.5})$	98,28
		ECUACIÓN 4	$(\text{Na [mg/L]})^{0.5} = (0.688948 * (\text{Cl [mg/L]})^{0.5}) + 3.76187$	97,34
	Mg	ECUACIÓN 5	$\text{Log}_{10}(\text{Mg [mg/L]}) = -0.433052 + (0.629937 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]}) + (0.00577751 * (\text{Cl [mg/L]})^{0.5})$	80,66
		ECUACIÓN 6	$\text{Log}_{10}(\text{Mg [mg/L]}) = (0.922497 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]}) - 0.762774$	78,8
	Sr	ECUACIÓN 7	$\text{Log}_{10}(\text{Sr [mg/L]}) = -1.66411 + (0.78354 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]}) + (0.230685 * \text{Log}_{10}(\text{Cl [mg/L]})$	81,23
		ECUACIÓN 8	$\text{Log}_{10}(\text{Sr [mg/L]}) = -1.60474 + (1.08302 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]})$	80,05
VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA	Na	ECUACIÓN 9	$(\text{Na [mg/L]}) = 160.937 - (1.32509 * (\text{Ca [mg/L]}) + (0.64378 * (\text{Cl [mg/L]})$	98,19
		ECUACIÓN 10	$(\text{Na [mg/L]}) = 262.894 + (0.497532 * (\text{Cl [mg/L]})$	95,58
	Mg	ECUACIÓN 11	$\text{Log}_{10}(\text{Mg [mg/L]}) = -0.843856 - (0.0732694 * \text{Log}_{10}(\text{SO}_4 \text{ [mg/L]}) + (0.586881 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]}) + (0.298024 * \text{Log}_{10}(\text{Cl [mg/L]})$	75,95
		ECUACIÓN 12	$\text{Log}_{10}(\text{Mg [mg/L]}) = -0.770227 + (0.952877 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]})$	72,24
	Sr	ECUACIÓN 13	$\text{Log}_{10}(\text{Sr [mg/L]}) = -1.41136 + (0.913416 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]}) + (0.186459 * \text{Log}_{10}(\text{Ba [mg/L]})$	79,03
		ECUACIÓN 14	$\text{Log}_{10}(\text{Sr [mg/L]}) = -1.59055 + (1.03743 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]})$	76,30
VALLE INFERIOR Y MEDIO DEL MAGDALENA	Na	ECUACIÓN 15	$(\text{Na [mg/L]}) = 162.303 - (1.21239 * (\text{Ca [mg/L]}) + (0.637973 * (\text{Cl [mg/L]})$	98,75
		ECUACIÓN 16	$(\text{Na [mg/L]}) = 171.832 + (0.532859 * (\text{Cl [mg/L]})$	97,12
	Mg	ECUACIÓN 17	$\text{Log}_{10}(\text{Mg [mg/L]}) = -1.01183 + (0.576749 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]}) - (0.055124 * \text{Log}_{10}(\text{Fe [mg/L]}) + (0.340264 * \text{Log}_{10}(\text{Cl [mg/L]})$	84,97
		ECUACIÓN 18	$\text{Log}_{10}(\text{Mg [mg/L]}) = -0.834024 + (0.978691 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]})$	81,05
	Sr	ECUACIÓN 19	$(\text{Sr [mg/L]})^{0.5} = -0.0522341 + (0.102281 * (\text{Ca [mg/L]})^{0.5} + (0.0391745 * (\text{Cl [mg/L]})^{0.5})$	84,09
		ECUACIÓN 20	$(\text{Sr [mg/L]})^{0.5} = 0.121204 + (0.0660985 * (\text{Cl [mg/L]})^{0.5})$	80,90
CAGUAN – PUTUMAYO	Na	ECUACIÓN 21	$(\text{Na [mg/L]}) = 2.42636 - (1.44071 * \text{Ca [mg/L]}) + (0,61654 * \text{Cl [mg/L]}) + (0.52549 * \text{HCO}_3^- \text{ [mg/L]})$	98,31
		ECUACIÓN 22	$(\text{Na [mg/L]}) = 171.261 + (0.512194 \text{Cl}^- \text{ [mg/L]})$	98,81
	Mg	ECUACIÓN 23	$\text{Log}_{10}(\text{Mg [mg/L]}) = -0.769107 + (0.950923 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]})$	76,45
	Sr	ECUACIÓN 24	$\text{Log}_{10}(\text{Sr [mg/L]}) = -1.70009 + (1.0931 * \text{Log}_{10}(\text{Ca [mg/L]})$	77,85

Nomenclatura

AFQs = Análisis fisicoquímicos

R^2 = Coeficiente de determinación

Na^+ = Ion Sodio

Mg^{++} = Ion Magnesio

Sr^{++} = Ion Estroncio

Ca^{++} = Ion Calcio

Fe^{++} = Ion Hierro

Ba^{++} = Ion Bario

Cl^- = Ion Cloruro

SO_4^- = Ion Sulfato

CO_3^- = Ion Carbonato

HCO_3^- = Ion Bicarbonato

Referencias

- Abdou, M., Carnegie, A., Mathews, S., McCarthy, K., O'Keefe, M., Raghuraman, B., . . . Xian, C. (2011). Valor del agua de formación. *Oilfield Review*, 3.
- Barba Diaz, D., & Martinez Villarreal, P. (2009). *Estudio y diseño de un sistema cerrado de reinyección de agua de formación para la estación central del campo Sacha*. Obtenido de academia.edu/27364160/Aguas_de_formacion
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., & Martinez, J. (2007). *Colombian Sedimentary Basins*. Bogota, Cundinamarca, Colombia: Copyright.
- Peña, V. (Abril de 2014). *CUENCAS SEDIMENTARIAS DE COLOMBIA*. Bucaramanga, Santander, Colombia.
- Serra, B. R. (s.f.). *Universo Formulas*. Obtenido de <https://www.universoformulas.com/estadistica/descriptiva/varianza/>
- Statgraphics.Net. (s.f.). *Statgraphics Net*. Obtenido de <https://statgraphics.net/>