

# Análisis estadístico multivariado aplicado a datos hidrogeológicos usando R: Acuífero Transfronterizo del Amazonas (ATAS) en Leticia - Amazonas \*

**Laura Ximena Echeverri Gutierrez** *Universidad Nacional de Colombia - sede Manizales*  
**Breiner Dan Bastidas Osejo** *Universidad de Antioquia*

---

**Resumen:** El Acuífero Transfronterizo del Amazonas (ATAS), identificado en 2007 en el programa Internationally Shared Aquifer Resources Management (ISARM), desempeña un papel crucial para la oferta hídrica de la región transfronteriza de Leticia (Colombia), Tabatinga (Brasil) y Santa Rosa (Perú). Dada su importancia y la creciente presión sobre este recurso, en este estudio se llevan a cabo análisis estadísticos multivariados, con el objeto de comprender el estado de calidad del agua del ATAS en Leticia, empleando el software R. Se desarrolla una aproximación a la identificación de fuentes de contaminación mediante análisis de componentes principales y análisis clúster. Se determinan los índices de calidad de aguas subterráneas (ICA-AS). En la investigación se empleó la database de composición química del inventario de puntos de agua subterránea de Leticia (OTCA & SHI, 2015).

**Keywords:** Agua subterránea, composición química, ICA, calidad del agua

---

## Introducción

El agua subterránea es un recurso fundamental para el abastecimiento de numerosas poblaciones en todo el mundo, ya que constituye aproximadamente el 96 % del agua dulce accesible del planeta (Betancur, 2023). Este recurso, renovable y finito, es vital para el sustento humano, el desarrollo socioeconómico y un componente valioso del ecosistema. Sin embargo, es vulnerable a impactos tanto naturales como antropogénicos. Diversas regiones transfronterizas dependen de este recurso, por lo tanto, sus condiciones de calidad y cantidad son aspectos de interés ambiental y socioeconómico (UNESCO, 2022).

La calidad del agua desempeña un papel esencial en la preservación de la salud, el medio ambiente, la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible. La gestión adecuada de este recurso se vuelve crucial para asegurar un futuro sostenible. Dicha calidad puede verse afectada por variaciones en el régimen hidrológico y, principalmente, por actividades antropogénicas, las cuales suelen generar el mayor impacto (OTCA, 2018).

En la actualidad, el uso de métodos estadísticos multivariados se ha generalizado en los estudios de caracterización hidroquímica y de calidad del agua subterránea ya que permiten reducir la dimensionalidad de los datos, identificar factores subyacentes que influyen en las variables de interés, desarrollar modelos para evaluar simultáneamente las relaciones entre las variables, inferir el origen de actividades que afectan los parámetros de calidad del agua, y entender las consecuencias de la interacción del sistema hídrico con el entorno geológico (Bodrud-Doza et al., 2016).

---

\* Autor de contacto: [lxcheverrig@unal.edu.co](mailto:lxcheverrig@unal.edu.co).

Esta investigación tiene como objetivo ampliar el análisis estadístico del inventario de puntos de agua subterránea, buscando identificar correlaciones entre variables y aproximarse a posibles fuentes de contaminación mediante el uso de métodos estadísticos multivariados.

## Materiales y métodos

### Zona de estudio

El municipio de Leticia, capital del departamento del Amazonas, se encuentra localizado en el extremo sur del país sobre la margen izquierda del río Amazonas, en la frontera entre Colombia, Perú y Brasil. Con una extensión territorial de  $5.968 \text{ km}^2$ , una altitud de  $82 \text{ m.s.n.m}$  y una temperatura media de 25 a 38 C, Leticia alberga una población de 42.280 personas según el Censo del DANE 2018 (Vélez and Bastidas, 2018). El Acuífero Transfronterizo Amazónico (ATAS) desempeña un papel de vital importancia en esta ciudad ribereña, siendo una de las principales fuentes de abastecimiento de agua (SHI and OTCA, 2015). En la figura 1 se muestra la ubicación de los sitios muestreados, contrastando su posición con las potenciales fuentes de contaminación identificadas en la zona.

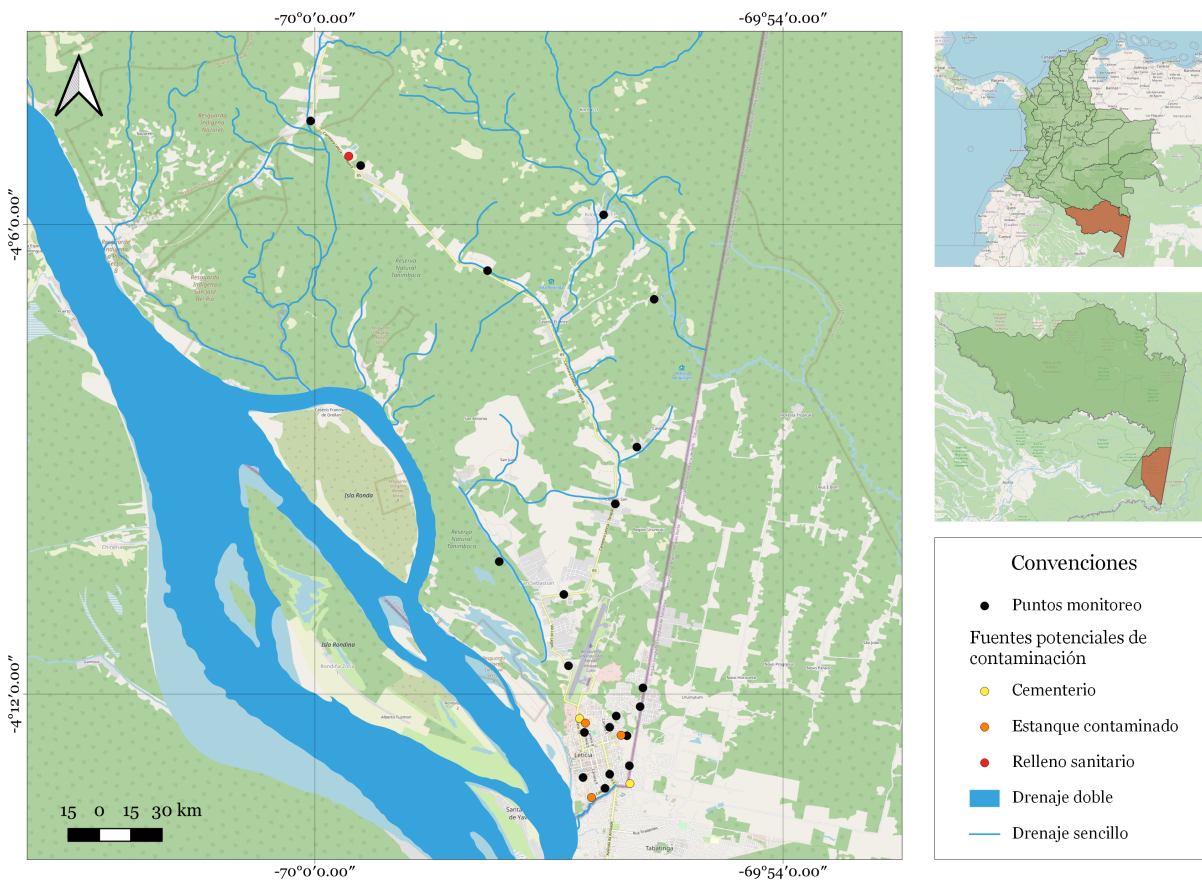


Figura 1: Mapa puntos de monitoreo.

## Información de interés

Esta investigación se desarrolló a partir de la información recopilada durante el Inventario de Puntos de Agua Subterránea, realizado entre abril y junio de 2015 como parte del proyecto “Gestión Integrada y Sostenible de los Recursos Hídricos Transfronterizos en la Cuenca del Río Amazonas Considerando la Variabilidad Climática y el Cambio Climático”, llevado a cabo por la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA). Este proyecto evaluó los sistemas acuíferos de Leticia a través de una caracterización hidrogeológica, hidroquímica e hidráulica de las aguas subterráneas en la región, con el objetivo de identificar diferentes puntos de agua, como pozos, aljibes, manantiales y piezómetros, y comprender la disponibilidad de agua subterránea junto con las características hidrogeológicas de la zona (SHI and OTCA, 2015).

La base de datos comprende 20 puntos de muestreo de agua subterránea en Leticia, con el registro de 29 especies químicas para cada observación. Esta información está disponible en el informe de la OTCA (2015) y en los registros públicos de la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia (CORPOAMAZONIA). Esta caracterización química se empleó como insumo principal para la aplicación de técnicas estadísticas descriptivas, métodos multivariados, indicadores de calidad de agua y análisis de componentes principales.

## Resultados

### Análisis de Componentes Principales

En la Tabla 1 se presentan la varianza, la varianza acumulada y los componentes principales VARIMAX rotados, obtenidos usando la función *prcomp*.

Tabla 1: Resultados PCA: rotación VARIMAX.

Parámetros rotación VARIMAX	PC1	PC2	PC3	PC4
Varianza	0.289	0.249	0.166	0.129
Varianza acumulativa	0.289	0.538	0.704	0.833
Bicarbonatos	0.788	-0.248	-0.461	
Cloruros	-0.204	-0.668	0.302	
Dureza total	0.834	-0.383	-0.326	
Color	0.958			
SST		0.143		-0.972
ST	0.193	-0.386	-0.128	-0.872
Turbiedad	0.887	0.106		-0.380
Hierro total	0.983			-0.108
Coliformes totales			-0.963	
Coliformes fecales	0.197		-0.938	
Potasio		-0.845	-0.274	
Magnesio	0.614	-0.443	-0.454	
Calcio	0.399	-0.416	-0.457	-0.216
Sodio	0.172	-0.907	-0.154	-0.173
SDT	0.370	-0.866	-0.149	-0.155
Conductividad	0.236	-0.853	0.127	0.102
OD	-0.213		-0.193	0.440

Aplicando el criterio de Kaiser (autovalores mayores a 1) se retuvieron 4 componentes principales que representan el 83.3 % de la varianza de los datos iniciales. El  $PC_1$  explica el 28.9 % de la varianza, el  $PC_2$  el 24.9 %, el  $PC_3$  el 16.6 % y el  $PC_4$  el 12.9 %. Tras el análisis de cargas con contribuciones mayores a 0.7 y menores a -0.7 (Echeverri, 2023), el  $PC_1$  se define como factor de procesos de recarga - fondo natural, mientras que el  $PC_2$  se caracteriza como factor de tránsito y descarga – evolución geogénica. Asimismo, el  $PC_3$  se identifica como factor de contaminación por carga orgánica, y el  $PC_4$  se asocia como factor de procesos de contaminación antrópica.

### *Análisis estadístico descriptivo*

La Figura 2 presenta gráficamente la correlación entre los parámetros fisicoquímicos estudiados. Se destaca una correlación positiva significativa entre los bicarbonatos y la dureza total, así como entre el color y el hierro total. Además, se observa una correlación significativa entre la turbidez y el hierro, entre las coliformes fecales y las coliformes totales, y entre los sólidos disueltos totales (SDT) y el sodio.

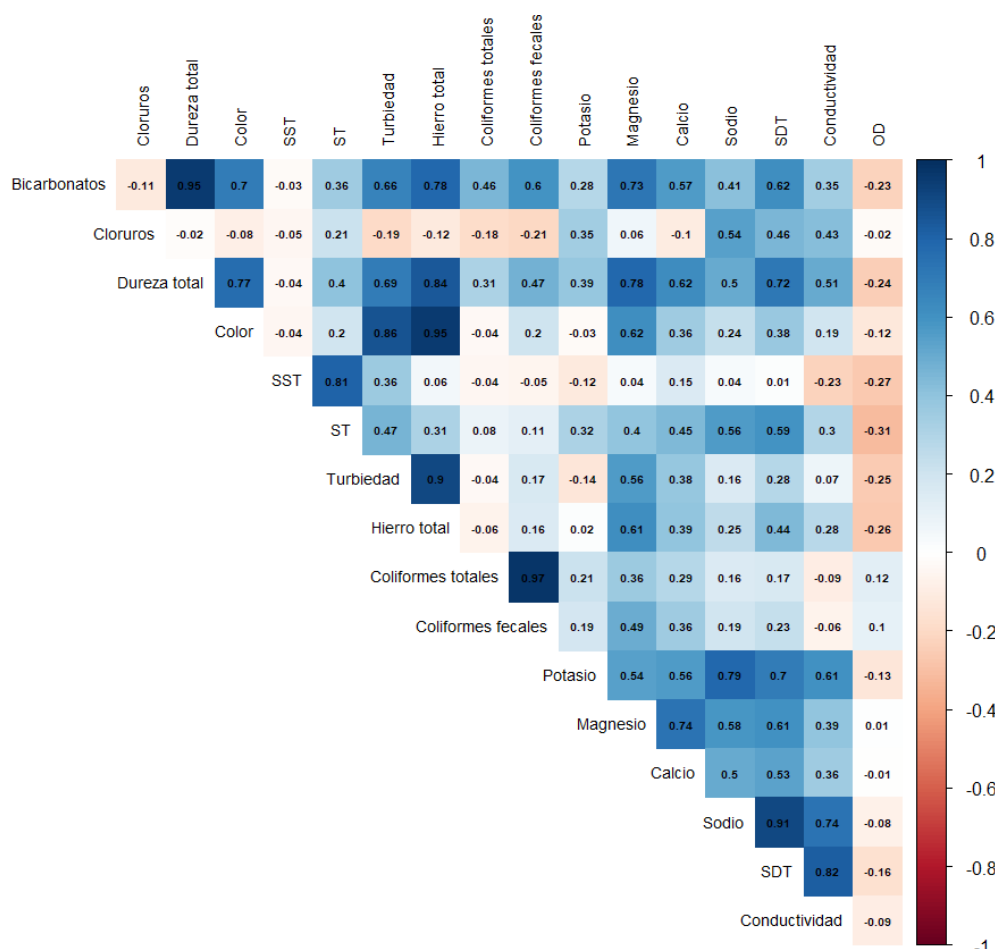


Figura 2: Análisis de correlación de variables.

De manera adicional, la Figura 3 expone los resultados obtenidos del análisis de clúster, estableciendo una relación con los hallazgos derivados del PCA, esta gráfica revela que, en relación

con los pozos, se identificaron 5 grupos mediante el análisis de clúster.

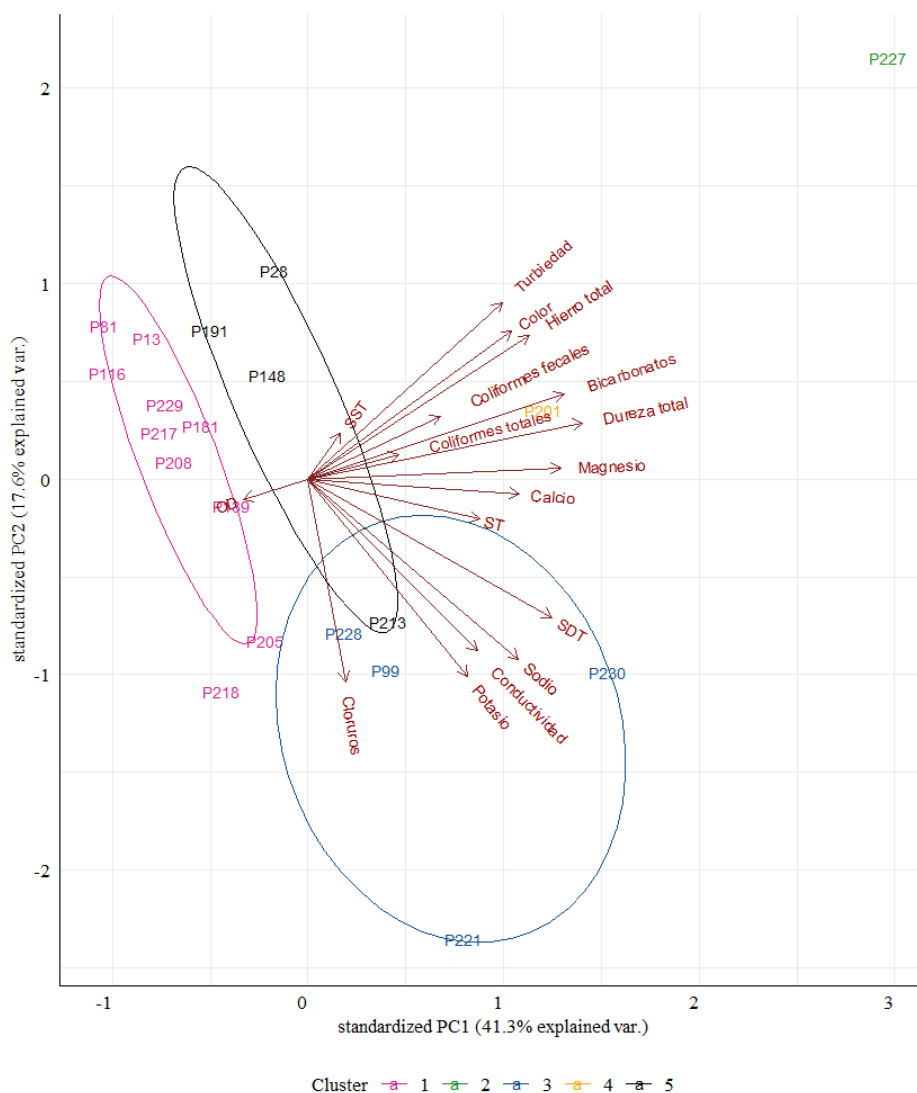


Figura 3: Análisis clúster

### Índice de Calidad del Agua

Los Índice de Calidad del Agua (ICA) son medidas numéricas que evalúan las condiciones físicas, químicas y biológicas de una corriente de agua en un lugar específico y periodo determinado. Estos índices proporcionan una rápida evaluación de la contaminación y orientan sobre las posibilidades de uso del agua en distintas actividades. Es crucial destacar que los ICA varían entre agua superficial y subterránea (ICA – AS), considerando las características propias de cada tipo de recurso hídrico, como los parámetros evaluados, los límites establecidos y los criterios específicos de calidad. La evaluación de la calidad del agua subterránea debe incluir indicadores representativos para garantizar un análisis integral y facilitar la toma de decisiones en su gestión y control (Martínez, 2007).

En la actualidad, se cuenta con diversos *ICA – AS*. En este estudio se analizaron 3 *ICA – AS*: los *ICA – AS* presentado en el informe de la OTCA (*ICA – AS* e *ICA – AS – corregido*) y el *ICA – AS* desarrollado por Martínez (2007), con el propósito de identificar posibles cambios significativos. Es importante resaltar que estas metodologías no solo abarcan conjuntos de especies distintos, sino que también asignan ponderaciones diferentes a dichas especies.

La Figura 4 presenta los resultados obtenidos para los *ICA – AS* aplicados. El *ICA OTCA 1* propuesto por (SHI and OTCA, 2015) relaciona valores típicamente menores, lo cual sugiere categorizaciones de calidad inferiores. En contraste, el *ICA – AS* de Martínez (2007) asigna valores más altos, resultando en calificaciones superiores para los mismos puntos de muestreo. Las influencias de las diferentes variables fisicoquímicas y microbiológicas en los resultados del *ICA – AS* podrían ser objeto de futuras investigaciones.

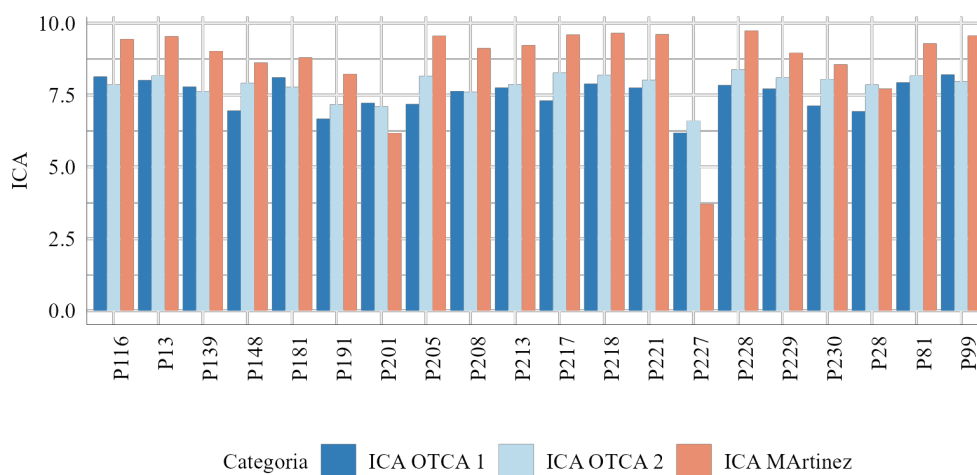


Figura 4: Resultados del ICA en los pozos por diferentes metodologías.

## Discusión y conclusiones

- Se identificaron correlaciones significativas entre diferentes parámetros, destacando una relación fuerte y positiva entre los bicarbonatos y la dureza total, el color y el hierro total, turbiedad y el hierro, coliformes fecales y coliformes totales, y entre los SDT y el sodio.
- El PCA permitió identificar 4 componentes principales:  $PC_1$  - Factor de procesos de recarga – fondo natural,  $PC_2$  - Factor de tránsito y descarga – evolución geogénica,  $PC_3$  - Factor de contaminación por carga orgánica y  $PC_4$  - Factor de procesos de contaminación antrópica.
- El análisis clúster clasificó observaciones similares en grupos separados, facilitando la identificación de fuentes de contaminación y proporcionando información sobre tendencias espaciales en la caracterización hidroquímica y de calidad.

## Código de R

Para conocer más detalles del código de R y los archivos utilizados para la realización de este estudio [visite este enlace](#).

## Referencias

- Betancur, Teresita. 2023. "El potencial de las aguas subterráneas en Antioquia."
- Bodrud-Doza, Md, A. R.M.Towfiqul Islam, Fahad Ahmed, Samiran Das, Narottam Saha and M. Safiur Rahman. 2016. "Characterization of groundwater quality using water evaluation indices, multivariate statistics and geostatistics in central Bangladesh." *Water Science* 30:19–40.
- Echeverri, Laura. 2023. "Evaluación del aporte de fuentes de emisión a la contaminación del aire por material particulado en la zona urbana de Manizales a partir de información de caracterización química y modelos de receptor."
- Martínez, Franco. 2007. "Propuesta de implementación de metodologías para la evaluación hidrogeoquímica y de calidad de las aguas subterráneas y aplicación a la zona del Bajo Cauca Antioqueño."
- OTCA. 2018. *Aguas Amazónicas, 10 Investigaciones sobre la cuenca hidrográfica más grande del mundo*.
- SHI and OTCA. 2015. "Evaluación de los Sistemas Acuíferos de la Región de Leticia - Colombia."
- UNESCO. 2022. "Cooperación en materia de aguas transfronterizas en América Latina y el Caribe."
- Vélez, María Victoria and Breiner Bastidas. 2018. "Cuantificación de la recarga de aguas subterráneas en un acuífero transfronterizo de la cuenca Amazónica Acuífero Leticia-Tabatinga."