

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS

PROYECTO

**“GESTIÓN DE LAS PLANICIES INUNDABLES EN UN CONTEXTO
DE CAMBIO GLOBAL”**

TEMA:

**MODELO CONCEPTUAL DE LA INTERACCIÓN RÍO-ACUÍFERO
MEDIANTE UN ANÁLISIS ISOTÓPICO-HIDROGEOLOGÍCO, EN LA
CUENCA BAJA DEL RÍO DAULE, GUAYAS-ECUADOR**

AUTOR:

LADY KATHERINE BRAVO MONTERO

Guayaquil - Ecuador

2022

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2 | ANTECEDENTES | 2 |
| 3 | ALCANCE | 3 |
| 4 | PROBLEMA | 3 |
| 5 | OBJETIVOS | 5 |
| 5.1 | Objetivo General | 5 |
| 5.2 | Objetivos Específicos..... | 5 |
| 6 | HIPÓTESIS | 6 |
| 7 | ZONA DE ESTUDIO..... | 6 |
| 8 | MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 8.1 | Estado del arte..... | 7 |
| 8.2 | Conceptos..... | 9 |
| 8.2.1 | Agua subterránea y acuífero | 9 |
| 8.2.2 | Métodos de caracterización hidroquímica e isotópica | 10 |
| 8.2.3 | Métodos de Prospección Geofísica..... | 10 |
| 8.2.4 | Modelo Interacción río – acuífero..... | 12 |
| 8.3 | . Análisis bibliométrico..... | 12 |
| 9 | METODOLOGÍA..... | 15 |
| 9.1 | Fase I: Análisis de Información Base | 17 |
| 9.2 | Fase II: Monitoreo de la calidad de agua superficial-subterránea..... | 17 |
| 9.3 | Fase III: Aplicación de Técnicas Multivariantes | 19 |
| 9.4 | Fase IV: Caracterización hidroquímica-isotópica del sistema río-acuífero..... | 19 |
| 9.5 | Fase V: Modelo conceptual de interacción río-acuífero..... | 20 |
| 10 | RESULTADOS | 21 |
| 10.1 | Procesamiento de Digital Elevation Model (DEM)..... | 21 |
| 10.2 | Análisis de la Información hidrológica | 22 |
| 10.3 | Monitoreo de la calidad del agua superficial-subterránea | 26 |
| 10.4 | Aplicación de Técnicas Multivariantes | 29 |
| 10.5 | Caracterización hidroquímica-isotópica del sistema río-acuífero | 32 |
| 10.6 | Modelo conceptual de interacción río-acuífero..... | 36 |
| 11 | CONCLUSIONES..... | 41 |
| 12 | RECOMENDACIONES..... | 42 |
| 13 | REFERENCIAS..... | 1 |
| 14 | ANEXOS | 9 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Esquema del problema..... | 5 |
| Figura 2. Ubicación de la zona de estudio..... | 7 |
| Figura 3. Configuración de electrodos de geoelectrica (a) Configuración de Wenner, (b) Configuración de Schlumberger, (c) Configuración dipolo-dipolo. | 12 |
| Figura 4. Contribución de países en la temática de agua subterránea e isótopos estables. | 13 |
| Figura 5. Mapa de co-ocurrencia de keywords. | 14 |
| Figura 6. Esquema de la metodología..... | 16 |
| Figura 7. Distribución de puntos de muestreo en época seca. | 18 |
| Figura 8. Distribución de puntos de muestreo en época lluviosa. | 18 |
| Figura 9. Representación de la configuración Schlumberger para SEVs..... | 21 |
| Figura 10. DEM de la zona de estudio..... | 22 |
| Figura 11. Precipitaciones medias mensuales para las estaciones M0475, M476, M466 y para datos CHIRPS en el periodo 2000-2015..... | 23 |
| Figura 12. Caudales mensuales de la estación M0466 en el periodo 2000-2015. | 24 |
| Figura 13. Análisis de consistencia de los datos de precipitación de estación meteorológica versus datos satelitales..... | 24 |
| Figura 14. Parámetros Hidrológicos en el periodo 2000-2021 | 25 |
| Figura 15. Cambios en el uso de suelo en 1990 y 2018 en la subcuenca del río Daule .. | 26 |
| Figura 16. Resultados de monitoreo de NO ₂ , NO ₃ , DO, ORP, PO ₄ y Turbidez para muestras de agua superficial-subterránea. Nota: mili voltios (mV). | 27 |
| Figura 17. Resultados de monitoreo de pH, salinidad, TDS y EC para muestras de agua superficial-subterránea. Nota: PSU: Practical Salinity Units. | 27 |
| Figura 18. Aplicación de Principal Component Analysis (PCA). a) PCA en Precipitaciones, b) PCA en parámetros de campo y laboratorio de agua superficial-subterránea. | 30 |
| Figura 19. Dendrograma de las campañas de muestreo en pozos y ríos | 30 |
| Figura 20. K-means multivariate clustering, método Euclidean de las campañas de muestreo en pozos y ríos | 31 |
| Figura 21. Caracterización hidroquímica en agua subterránea. a) en época lluviosa y b) en época seca..... | 32 |
| Figura 22. Caracterización hidroquímica en agua superficial. a) en época lluviosa y b) en época seca..... | 33 |
| Figura 23. Radio Cl/Br..... | 34 |
| Figura 24. Diagrama de la relación ² H/ ¹⁸ O en las aguas superficiales y subterráneas de la subcuenca del río Daule. Nota: Global Meteoric Water Line (GMWL)..... | 35 |
| Figura 25. Distribución espacial de los SEVs en la zona de estudio..... | 37 |
| Figura 26. Interpretación de SEV #1 en época lluviosa | 38 |
| Figura 27. Interpretación de SEV #6 en época lluviosa | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 28. Modelo conceptual de la interacción río-acuífero..... | 40 |
| Figura 29. Mapa de permeabilidad en la subcuenca del río Daule | 9 |
| Figura 30. Subdivisión de subcuencas en la zona de estudio..... | 9 |
| Figura 31. Precipitaciones mensuales históricas de la estación M0466..... | 10 |
| Figura 32. Precipitaciones mensuales históricas de la estación M0475..... | 10 |
| Figura 33. Precipitaciones mensuales históricas de la estación M0476..... | 11 |
| Figura 34. Mapa de pendientes de la zona de estudio | 11 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Valores de los parámetros para agua superficial-subterránea | 28 |
| Tabla 2. Interpretación de SEV #1 en época lluviosa | 39 |
| Tabla 3. Interpretación de SEV # 6 en época lluviosa | 39 |

1 INTRODUCCIÓN

La distribución del agua a nivel mundial es inequitativa; únicamente el 3% del total del agua del planeta es dulce, de este total, el 30% es agua subterránea (Diop, S., & Rekacewicz et al., 2003; ONU, 2018). El agua subterránea es una parte esencial del ciclo hidrológico, debido a que miles de millones de personas la utilizan para beber en todo el mundo, por lo que la gestión sostenible del recurso es imprescindible (Carrard et al., 2019; Du et al., 2012; Karlović et al., 2021; Loucks & Jia, 2012). En el caso de Ecuador continental, el mayor potencial hídrico del país (81%) se ubica en la vertiente Amazónica, donde vive el 4% de la población nacional. Mientras que, en la región Costa se tiene el 19% de este potencial (Paúl Carrión-Mero et al., 2019).

Se evidencian problemas de escasez de agua superficial debido a esta inequidad en la distribución del recurso. Sumado a esto, el crecimiento poblacional, industrial y agricultura convierten en un reto la gestión y extracción sostenible del agua subterránea para satisfacer la creciente demanda (Rasul, 2016; H. Yang et al., 2003). Por lo tanto, son de vital importancia los estudios hidroquímicos a detalle en la prevención, control y resolución de los problemas ambientales derivados de la contaminación de las aguas subterráneas para la comprensión de los diferentes procesos y mecanismos que conducen a la degradación de la calidad del agua y en consecuencia adoptar medidas preventivas o correctivas y que contribuyan a la gestión sostenible del recurso (Helena, B.A., Vega, M., Barrado, 1999; Wu et al., 2015).

En la gestión de aguas subterráneas es indispensable la caracterización de acuíferos y comprender su evolución hidroquímica (Barbieri et al., 2005; Ujević Bošnjak et al., 2012). Por ello, la caracterización hidroquímica permite medir los parámetros fisicoquímicos para la determinación de los cambios en la química del agua, a nivel espacial y temporal (Abed et al., 2021).

Es importante conocer que la composición química del agua subterránea natural puede verse afectada por varios factores, incluyendo eventos de lluvia en la cuenca hidrográfica, intercambio de iones, dilución de materiales y actividad antrópica (Paúl Carrión-Mero, Montalván, Morante-Carballo, Heredia, et al., 2021; Kim et al., 2003; Ma et al., 2017).

Complementariamente, el análisis de isótopos estables del ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) han sido aplicados a nivel mundial durante más de 50 años en estudios de identificación de las fuentes de recarga de acuíferos, origen, caracterización, contaminación de aguas subterráneas, superficiales y de precipitación (Chagué-Goff et al., 2010)

La zona de estudio comprende el acuífero del río Daule, perteneciente a la subcuenca del río Daule, que a su vez se ubica en la cuenca hidrográfica del río Guayas. Esta cuenca es la más grande de la costa del Pacífico Sur, con una extensión de 33,214 km² y representa más del 12% de la extensión territorial del Ecuador (Bravo-Velásquez, 2017; Huayamave, 2013), su desarrollo se cimienta en la agricultura, ganadería, acuicultura, pesca, minería, navegación, turismo y asentamientos poblacionales (Montaño-Armijos, 2010), cuyas demandas hídricas crecen de forma anual debido al incremento de la población urbana y rural.

Este estudio exploratorio describe la interacción del sistema río-acuífero en la subcuenca baja del río Daule basándose en una caracterización hidroquímica mediante el diagrama de Piper (aniones-cationes), para el reconocimiento de la química del agua y relacionarlo con los parámetros de campo y laboratorio medidos en agua superficial y subterránea. En este sentido, se planteó como objetivo generar un modelo del comportamiento de la interacción río-acuífero en la subcuenca baja del río Daule, mediante una caracterización hidroquímica e isotópica y medición de niveles en una red de pozos, para la configuración espacial del flujo en el sector.

2 ANTECEDENTES

Este estudio está vinculado al Proyecto de Investigación “Desarrollar y gestionar las planicies inundables en un contexto de cambio global”, con un convenio de cooperación entre la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), la empresa pública de servicios (ESPOL-TECH E.P.) y Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières (AVSF).

En Ecuador, AVSF es el ejecutor del proyecto COSTEA, el cual tiene la finalidad de generar conocimientos con fines aplicados en la subcuenca del río Daule. En este sentido, el presente estudio pertenece al eje temático 2 que incluye la caracterización hidrogeológica e hidráulica de las llanuras inundables de la mencionada subcuenca.

Cabe mencionar que en la actualidad no se cuenta con una base de información previa relacionada a estudios hidroquímicos, isotópicos, geofísicos en el área que comprende el acuífero del río Daule. Sin embargo, existen estudios de monitoreo (no continuo) sobre parámetros de calidad del agua superficial en la cuenca hidrográfica del río Guayas por parte de instituciones como INTERAGUA y en el sector aguas arriba (represa Daule-Peripa). Adicionalmente, la academia ha contribuido con publicaciones científicas relacionadas a temas de contaminación por pesticidas en la cuenca del Guayas, vulnerabilidad del acuífero del río Daule, entre otros. En consecuencia, estos estudios al estar enfocados en otras áreas del saber permiten

tener un conocimiento general, pero es indispensable la generación de una base de datos del sistema agua superficial-agua subterránea para la comprensión de la interacción del sistema río-acuífero.

3 ALCANCE

Para definir el alcance de investigación se consideraron los siguientes ítems: i) objetivos de la investigación, ii) interrogante de investigación, y iii) limitaciones de la investigación (Ávila-Baray, 2006). El alcance de este estudio es de tipo correlacional porque se asociará variables medidas en aguas superficiales-subterráneas que incluyen: parámetros físico-químicos, aniones-cationes, e isótopos estables. Los resultados de estos análisis permitirían emitir interpretaciones de la interacción del sistema río-acuífero de la cuenca baja del río Daule. Este trabajo está vinculado al proyecto 'Desarrollo de modelos ecohidrológicos para la gestión integrada de cuencas hidrográficas', que se lleva a cabo en CADS-ESPOL en colaboración con la red internacional Agronomes and Vétérinaires Sans Frontières (AVSF) en el periodo septiembre 2021-Agosto 2022.

4 PROBLEMA

Las principales actividades económicas en el subcuenca del río Daule son la agricultura, pesca y la generación de energía hidroeléctrica (Deknock et al., 2019). La mayor fuente de contaminantes en este sector proviene de la agricultura, por el uso de grandes cantidades de compuestos agroquímicos (Huayamave, 2013). Estas actividades agrícolas amenazan las aguas subterráneas del acuífero del río Daule con contaminación por nitratos, por las grandes necesidades de fertilizantes y agua (Ribeiro et al., 2017).

En el sector también se evidencian cambios en el uso de la tierra como consecuencia de las actividades antropogénicas. En 1990, aproximadamente el 40% del territorio que comprende el acuífero del río Daule eran tierras agrícolas. Mientras que, en el 2018, alrededor del 95% se volvieron tierras agrícolas, perdiendo grandes proporciones de cobertura tipo bosque y otro tipo de vegetación (Borbor-Cordova et al., 2006).

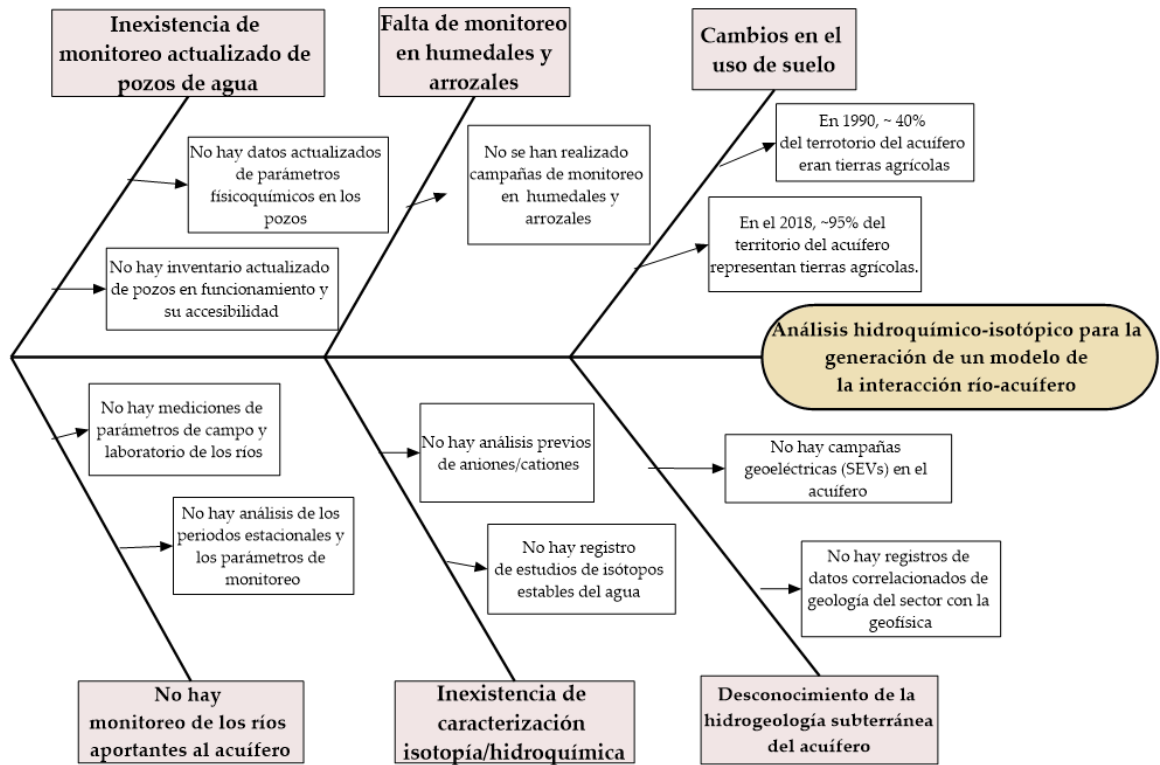
Adicionalmente, se construyó la represa Daule-Peripa ubicada aguas arriba (Alvarez-Mieles et al., 2013; Thi Nguyen et al., 2015). El represamiento de aguas influye en la calidad del río aguas abajo del Daule y en la acumulación de sedimentos (Hidalgo-Bastidas et al., 2018; Huayamave, 2013).

También está la contaminación causada por el urbanismo debido a que las aguas residuales urbanas aportan ciertos elementos (sulfatos, bicarbonatos, fosfatos, nitratos sodio, potasio, cloro, entre otros) en un contexto de falta parcial o total de alcantarillado y tratamiento de las aguas residuales, que incrementan su concentración en el río (Rose, 2007).

Consecuentemente, la actividad agrícola, la presa Daule-Peripa, la contaminación, el cambio de uso de suelo y el crecimiento poblacional influyen directamente sobre el sistema río-acuífero. Sin embargo, no se tiene información sobre la interacción río-acuífero Daule, lo que incluye el conocimiento de las características hidroquímicas del agua superficial-subterránea e identificando las posibles fuentes de contaminación del recurso, fuentes de recarga del acuífero, y conocimiento preliminar de la calidad del agua superficial-subterránea con el muestreo de parámetros de campo y laboratorio. Por lo tanto, este estudio piloto apunta a generar ese tipo información básica que permita el planteamiento de estrategias para la gestión sostenible del sistema agua superficial-agua subterránea en el sector. La representación de la problemática de la zona de estudio se muestra en la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 1.

En este estudio se plantea como pregunta de investigación: ¿Cómo reconocer los lineamientos principales del modelo de interacción río-acuífero mediante una caracterización hidroquímica en la subcuenca baja del río Daule?.



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 1. Esquema del problema.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Generar un modelo conceptual de la interacción río-acuífero en la subcuenca baja del río Daule, mediante una caracterización hidroquímica-isotópica y medición de niveles en una red de pozos, para la configuración espacial del flujo en el sector.

5.2 Objetivos Específicos

- Determinar los cambios en la química del agua, a nivel espacial y temporal mediante un análisis de iones representativos e isótopos estables de agua para una caracterización hidroquímica-isotópica.
- Analizar la recarga del agua subterránea en el acuífero mediante el procesamiento de información de parámetros hidrológicos y el esquema de iones trazadores (Cl/Br).

- Interpretar los datos de los parámetros de campo-laboratorio mediante la aplicación de técnicas multivariantes para el conocimiento del comportamiento hidrológico del sistema río-acuífero.
- Establecer un modelo conceptual mediante el análisis de datos hidrológicos de los ríos-pozos, niveles piezométricos, y campañas geoeléctricas (SEVs), para la obtención de las características espaciales y estacionales del sistema río-acuífero.

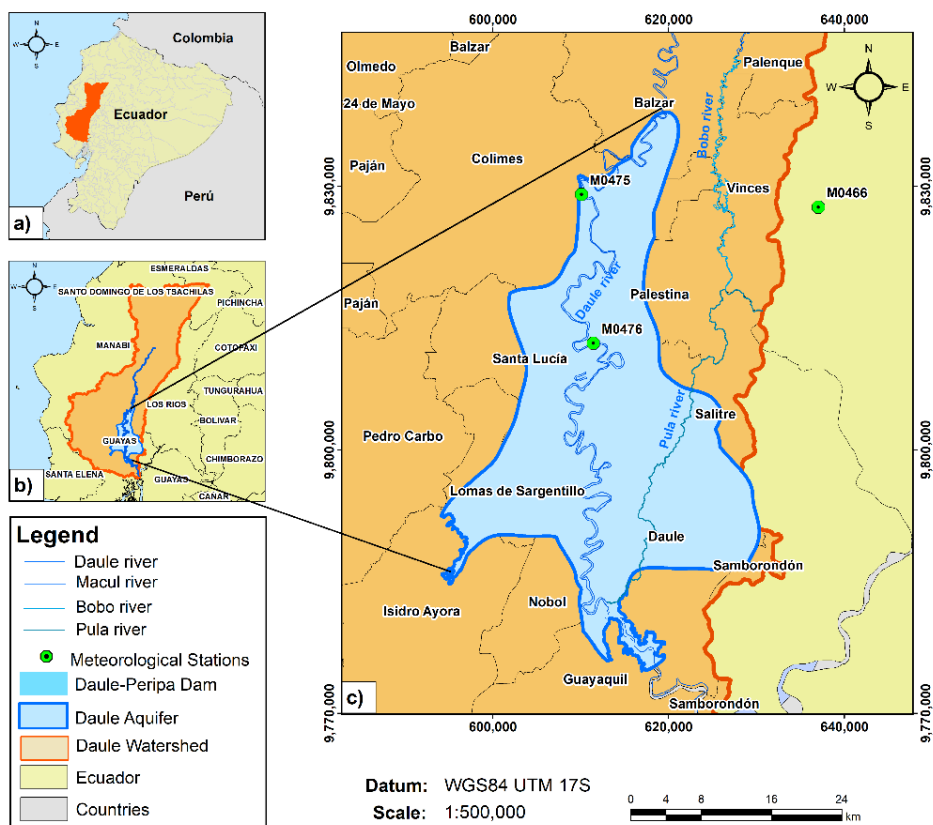
6 HIPÓTESIS

H1: El análisis isotópico-hidrogeológico determina la comprensión de la interacción río-acuífero

Ho: El análisis isotópico-hidrogeológico no determina la comprensión de la interacción río-acuífero

7 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio comprende el acuífero del río Daule, que se ubica en la parte baja de la subcuenca del río Daule (ver Figura 2). El río Daule nace en el nudo de Sandomo, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, muy próximo a San Miguel o Peripa. Este río tiene una longitud aproximada de 260 km y forma la subcuenca del río Daule, la más grande de las subcuencas de la cuenca del río Guayas, abarcando una extensión territorial de 11567,15 km², que representa el 5% del territorio nacional y el 36% de la cuenca hidrográfica del río Guayas (Huayamave, 2013). En la parte alta de la subcuenca se ubica la represa Daule-Peripa, (CELEC, 2014). En la zona baja está el área de estudio que incluye los cantones Daule, Lomas de Sargentillo, Santa Lucía, Salitre, Palestina y Balzar, que pertenecen a la provincia del Guayas, Ecuador.



Fuente: SENAGUA (2012) y SIN (2014).

Figura 2. Ubicación de la zona de estudio.

8 MARCO TEÓRICO

8.1 Estado del arte

La aplicación de isótopos estables en las aguas subterráneas tiene múltiples beneficios. Por ejemplo, un estudio en Japón usó isótopos de agua estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) e información hidroquímica para estimar la recarga de agua subterránea en un área de transición entre montaña y llanura (Liu & Yamanaka, 2012). En la cuenca de Maheshwaram en India, estos isótopos se utilizaron para comprender la dinámica de las fuentes de agua subterránea y las rutas de flujo en la cuenca (Negrel et al., 2011). Complementariamente, en el caso de la cuenca de Qaidam, China, la implementación de cationes y aniones representativos (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) e isótopos (^2H , ^{18}O , ^3H , ^{13}C y ^{14}C) mejoró la comprensión del origen, el patrón de flujo, la evolución hidroquímica y los mecanismos de control de los sistemas regionales de aguas subterráneas (Xiao et al., 2018). Finalmente, las relaciones entre los valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en la precipitación y la elevación representan herramientas útiles para

evaluar las áreas de recarga de aguas subterráneas y las rutas de flujo (Fackrell et al., 2020).

La cuenca del río Guayas constituye el sistema fluvial más importante de la costa suroccidental del Pacífico, por lo que el monitoreo de calidad de agua es indispensable. En el 2006, se examinaron las relaciones entre el uso de la tierra, los insumos antropogénicos de nutrientes y las exportaciones de nutrientes fluviales en la cuenca del río Guayas (Borbor-Cordova et al., 2006).

También se han estudiado las relaciones entre las comunidades bióticas acuáticas y la calidad del agua en un sistema de ríos tropicales y humedales de la cuenca del río Guayas mediante el cálculo de métricas bióticas (abundancia, riqueza de taxones, diversidad y uniformidad) la aplicación de un índice biótico a la comunidad de macroinvertebrados (Alvarez-Mieles et al., 2013).

En el estudio de Damanik et al. (2016) se calcularon dos índices bióticos para evaluar la calidad del agua con un enfoque ecológico. Como resultado, los niveles de nutrientes detectados en las zonas agrícolas eran relativamente bajos, ilustrando que los tipos de cultivos y los métodos de cultivo actuales no conducían a la eutrofización (Damanik-Ambarita et al., 2016).

También, se evaluó la contaminación por plaguicidas del medio ambiente de agua dulce en la cuenca del río Guayas, detectándose 108 sitios de muestreo con el 60% de contaminación y se identificaron 26 productos pesticidas (Deknock et al., 2019). Y se determinó la relación con la red hidrográfica y las zonas inundables mediante un modelo estratigráfico de los sedimentos en la cuenca baja del río Guayas (Burgos-Torres, 2017).

Finalmente, se evaluó el impacto de las actividades agrícolas en la calidad de las aguas subterráneas del acuífero del río Daule, evidenciando que las áreas más vulnerables a la contaminación se encuentran en los perímetros de riego de los arrozales y que gran parte del acuífero tiene un alto riesgo de contaminación por nitratos (Ribeiro et al., 2017). Además, se determinó la presencia de Cadmio en los ríos Guayas, Daule y Babahoyo (Bravo-Velásquez, 2017).

Lo antes mencionado lleva a proponer como finalidad de este estudio la generación de un modelo de la interacción río-acuífero en la subcuenca baja del río Daule, mediante una caracterización hidroquímica-isotópica y medición de niveles en una red de pozos, para la configuración espacial del flujo en el sector. Este tipo de estudios han sido aplicados con éxito a nivel mundial. En el caso de Ecuador, se han realizado

aproximaciones para el entendimiento de la interacción río-acuífero en el cuenca hidrográfica de Valdivia, Santa Elena mediante la elaboración de un modelo conceptual, considerando la geología, Sondeos Eléctricos Verticales y la medición de parámetros físico químicos (Paúl Carrión-Mero, Morante-Carballo, et al., 2021). Así también, en la subcuenca del río Tarqui se generó un modelo físicamente basado, denominado WetSpa 'Water and Energy Transfer between Soil, Plants and the Atmosphere', para representar la interacción río acuífero, empleando principalmente datos de caudales, precipitación y niveles piezométricos (Guzmán et al., 2016).

8.2 Conceptos

8.2.1 Agua subterránea y acuífero

El agua subterránea (groundwater) es un importante recurso natural que ayuda al crecimiento del cultivo y la manufactura de los países, sus usos domésticos y consumo humano (Hwang et al., 2017). El agua subterránea se mueve a través de los acuíferos, interactuando con el material del acuífero en el medio subterráneo, lo que altera su composición química por varios procesos hidrogeoquímicos (Abed et al., 2021).

Otro concepto importante es acuífero sobreexplotado, cuando se perciben algunos resultados negativos persistentes del desarrollo del acuífero, como una disminución continua del nivel del agua, un deterioro progresivo de la calidad del agua, un aumento del costo de extracción o un daño ecológico (Custodio, 2002; Harou & Lund, 2008).

Con respecto a las medidas de recuperación, el Aquifer Storage and Recovery (ASR), que incluye la inyección de agua en un pozo para su almacenamiento y recuperación del mismo pozo (Tuinhof & Heederik, 2003). Así también, la transferencia y recuperación de almacenamiento de acuíferos o Aquifer Storage Transfer and Recovery (ASTR) implica la inyección de agua en un pozo para su almacenamiento y recuperación de un pozo diferente, generalmente para proporcionar tratamiento de agua adicional (Tuinhof & Heederik, 2003).

El manejo de la recarga de acuíferos o Management of Aquifer Recharge (MAR) es una herramienta de administración de aguas subterráneas, que pueden ser útiles para represurizar acuíferos sujetos a niveles de agua decrecientes, rendimientos decrecientes, intrusión salina o hundimiento de la tierra (Dillon, 2005).

8.2.2 Métodos de caracterización hidroquímica e isotópica

La caracterización hidroquímica representa una técnica de medición de parámetros físico-químicos del agua para la determinación de los cambios en la química del agua, a nivel espacial y temporal (Abed et al., 2021). En la gestión de aguas subterráneas es indispensable la caracterización de acuíferos y comprender su evolución hidroquímica (Barbieri et al., 2005; Ujević Bošnjak et al., 2012). En la caracterización isotópica de acuíferos se contempla la utilización de isótopos estables, principalmente el O^{18} y H^2 , permiten analizar la recarga de agua subterránea en acuíferos (Huang et al., 2018; Iacurto et al., 2021; W. Jiang et al., 2019).

El efecto de altitud y latitud de la precipitación causa variaciones de isótopos estables de hidrógeno y oxígeno en el agua subterránea (W. Jiang et al., 2019). Es por esto, que la aplicación de metodologías basada en isótopos estables contribuye en el conocimiento de la calidad de agua. Estas metodologías se emplean en la comunidad hidrológica para la evaluación, el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos, y ahora son una parte integral de muchos estudios ambientales y de la calidad del agua (Barbieri et al., 2005).

Los principales procesos que influyen en la química del agua subterránea son la salinización, la precipitación, la disolución de minerales, el intercambio catiónico y la actividad humana (Adams et al., 2001). Por lo tanto, los datos de isótopos estables en el agua ($\delta^{18}O$ y δ^2H) sirven como marcadores para identificar diferentes rutas de flujo y orígenes del agua (Duque et al., 2019). Las interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales son complejas porque están relacionadas con el clima, el relieve, la geología y los factores bióticos (Hokanson et al., 2019; Sophocleous, 2002). Por lo tanto, los datos hidrogeoquímicos y los isótopos ambientales estables se utilizan para identificar fuentes de recarga e interacciones agua-roca en la dirección del flujo de agua subterránea (Chen et al., 2014; Li et al., 2016).

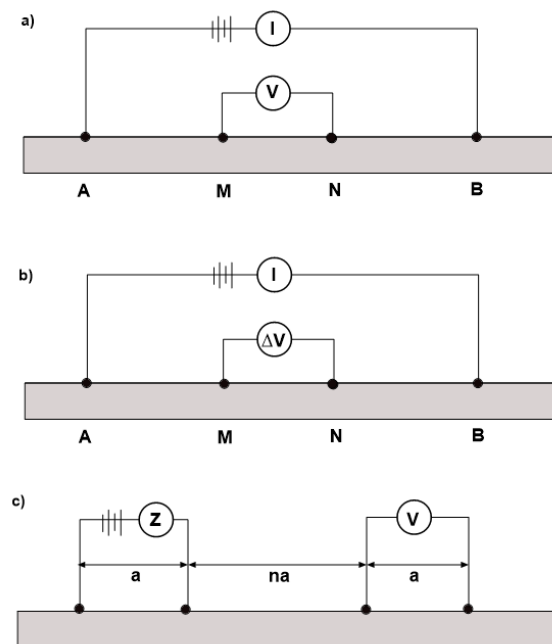
8.2.3 Métodos de Prospección Geofísica

Las relaciones entre las características del acuífero y los parámetros eléctricos de las capas geoeléctricas han sido estudiadas y revisadas por muchos autores (Agbasi & Etuk, 2016; D. D. C. Mbonu, J. O. Ebeniro & Ekine, 1991; Kelly, 1977; Mazáč et al., 1985; Mopa et al., 2017; Onuoha & Mbazi, 1988). Algunos investigadores asumen que, tanto la geología como la calidad del agua subterránea permanecen bastante constantes dentro del área de interés y las relaciones deducidas entre el acuífero y los

parámetros geofísicos se basan en esta suposición (Harry, T. A., Ushie, F. A., & Agbasi, 2018).

La geoelectrica es uno de los métodos geofísicos más usados dentro de la exploración de aguas subterráneas, ya que estudia el comportamiento, tanto de rocas como de sedimentos respecto a la corriente eléctrica. Se utiliza como método indirecto para conocer la litología del subsuelo, diferenciando entre las capas permeables e impermeables, su espesor y proporcionando información sobre la salinidad del agua de saturación y como consecuencia su carácter acuífero (Raji & Abdulkadir, 2020). La implementación de técnicas geoelectricas como los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) permiten determinar algunos parámetros hidráulicos en sistemas de acuíferos (Kazakis et al., 2016). Los SEVs son la técnica geofísica más utilizada para la prospección de aguas subterráneas (Kumar et al., 2007).

Existen varios métodos de prospección geoelectrica para la investigación de aguas subterráneas. Existen varios métodos de resistividad según la configuración de los electrodos de potencial y los electrodos de corriente, entre ellos: Schlumberger, Wenner y Dipolo-Dipolo (ver Figura 3). Sin embargo, el método de Schlumberger es mayormente utilizado para la investigación de aguas subterráneas en campos aluviales y de rocas duras, está conformado de dos electrodos externos o inyección de corriente (A-B) y dos electrodos internos o de medición del potencial (M-N) (Rolia & Sutjningsih, 2018).



Fuente: Adaptado de (Rolia & Sutjningsih, 2018).

Figura 3. Configuración de electrodos de geoelectrica (a) Configuración de Wenner, (b) Configuración de Schlumberger, (c) Configuración dipolo-dipolo.

8.2.4 Modelo Interacción río – acuífero

La interacción río-acuífero se incluye normalmente en los modelos regionales de aguas subterráneas utilizando coeficientes de río (conductancias de lecho de río) (Rushton, 2007). La cuantificación de la interacción río-acuífero es indispensable para la gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas, especialmente en ambientes áridos y semiáridos, con una evapotranspiración potencial mucho mayor que la precipitación (Song et al., 2020; Xie et al., 2016). Los modelos de interacción río-acuífero permiten determinar la influencia que tiene la extracción de agua subterránea en la descarga del río (Sanz et al., 2011).

Para el modelamiento de la interacción río-acuífero en la cuenca hidrográfica del río Júcar en España se ha empleado el modelo PATRICAL, de balance hídrico a gran escala, que incluye datos de caudales, ríos-interacciones acuíferas, interacciones entre acuíferos, descarga de aguas subterráneas a los humedales y al mar y niveles medios de las aguas subterráneas en los acuíferos (Pérez-Martín et al., 2014). En el caso del acuífero del valle superior de Limmat, en Zurich se modeló la interacción entre ríos y acuíferos con coeficientes de fuga constante espacial y temporalmente (Doppler et al., 2007). Otro tipo de modelo es el modelo PARFLOW de superficie-subsuelo paralelo, que se utilizó para investigar los patrones espaciales y la dinámica temporal del intercambio río-acuífero en un sistema aluvial con capa freática profunda (Frei et al., 2009).

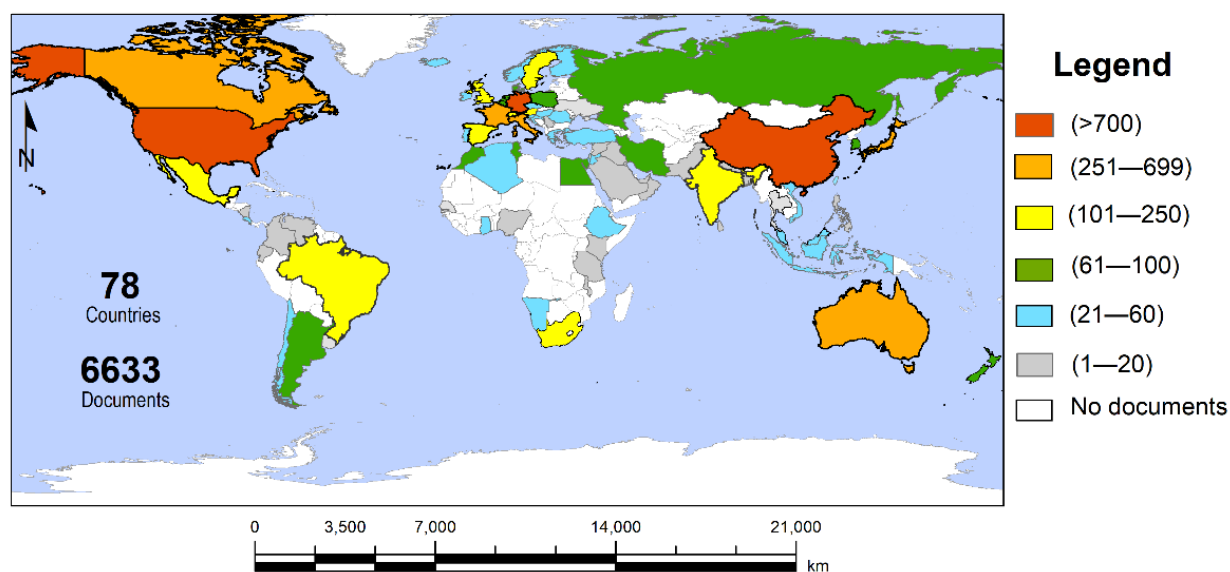
8.3 . Análisis bibliométrico

La bibliometría proporciona una respuesta clara y precisa a un análisis global de un país, revista o campo de estudio determinado (Galbán-Rodríguez et al., 2019; Herrera-Franco et al., 2021; Merigó & Yang, 2017). Además, estos estudios bibliométricos permiten explorar la estructura de las publicaciones científicas, patrones de colaboración y áreas de conocimiento destacadas (Donthu et al., 2021; Y. Jiang et al., 2019). Varios campos de investigación han aplicado la bibliometría en la evaluación y predicción de la productividad científica, el desarrollo y las tendencias futuras (Paúl Carrión-Mero, Montalván-Burbano, et al., 2021; Leitão et al., 2022; Tatry et al., 2014; Yu et al., 2021; Zhang et al., 2021). Por lo tanto, en este trabajo se realizó una revisión

bibliométrica en las bases de datos Scopus y Web of Science (WoS). En la ecuación de búsqueda en las bases de datos mencionadas se utilizaron dos palabras claves: i) groundwater, y ii) stable isotopes. Como resultado se obtuvieron 6633 publicaciones científicas relacionadas a este tópico en el periodo entre 1969 y 2021.

Se generaron dos mapas bibliométricos para la representación de la contribución de países (ver Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 4), observándose que 78 países han investigado sobre la temática, sobresaliendo Estados Unidos y China.

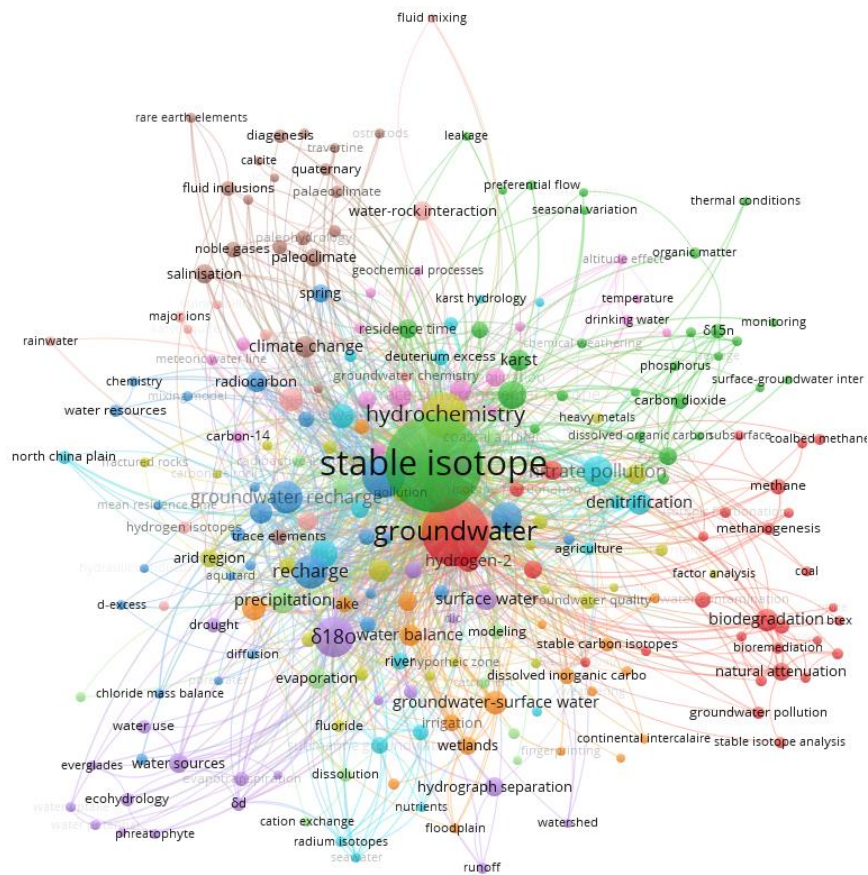


Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 4. Contribución de países en la temática de agua subterránea e isótopos estables.

En la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 5 se presenta el mapa bibliométrico de co-ocurrencia de palabras claves (keywords). Se obtuvieron un total de 9580 palabras clave, de las cuales 340 tienen una co-ocurrencia de al menos cinco veces. Se muestran 11 clústeres, 340 nodos (palabras clave), 5356 enlaces y una fuerza de enlace total de 15 807. El término central es isótopo estable (clúster 4 en amarillo) con 2056 ocurrencias y una relación con 310 términos (tópicos).



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 5. Mapa de co-ocurrencia de keywords.

Cluster 1, denominado 'contaminación por nitratos' es el área de investigación más extensa y según la co-ocurrencia de términos se considera el octavo grupo de investigación más importante. En este cluster las tendencias de investigación se vinculan principalmente con: i) fuentes de contaminación por nitratos de aguas subterráneas en áreas agrícolas, ii) aplicación de isótopos de nitrógeno y oxígeno para la identificación de contaminación por nitratos en aguas superficiales, iii) contaminación por nitratos agrícolas y urbanos.

Cluster 2, denominado 'agua subterránea e isótopos'. En este cluster, las futuras líneas de investigación están enfocadas en: i) evidencia de intrusión de agua de isótopos de aguas subterráneas, ii) isótopos de aguas subterráneas y sus implicaciones para las fuentes de recarga, y iii) uso de isótopos de precipitaciones y aguas subterráneas para interpretar la hidrología regional.

Cluster 3, denominado 'hidroquímica'. En este cluster, las publicaciones en tendencia están relacionadas a los siguientes temas: i) modelado de la evolución hidroquímica

en sistemas acuíferos, ii) interacción hidrológica entre la descarga de agua dulce subterránea submarina y el agua subterránea costera, iii) identificación de fuentes y zonas de recarga de agua subterránea a partir de la hidroquímica y los isótopos estables, y iv) rastreo de fuentes de nitrato en aguas urbanas usando hidroquímica e isótopo estable.

Cluster 4, denominado 'isótopos estables y ambientales'. Las futuras líneas de investigación asociadas a esta temática incluyen: i) determinación del origen del nitrato en cuencas usando isótopos ambientales, ii) análisis de isótopos ambientales e hidroquímicos para caracterizar un sistema acuífero kárstico, iii) edad y origen de las aguas subterráneas, y iv) trazadores hidroquímicos e isótopos ambientales aplicados a la modelación conceptual.

Cluster 5, denominado 'isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ '. En este cluster las tendencias de investigación se orientan a: i) mejorar la caracterización estructural de las aguas subterráneas, ii) comprender el estrés de humedad por evaporación en áreas áridas, iii) identificar las fuentes de recarga de las aguas subterráneas, iv) rastrear los sistemas de flujo de aguas superficiales y subterráneas, y v) la interacción agua superficial-agua subterránea.

Los clusters del 6 al 11 son de menor extensión ya que contienen entre 6 y 28 nodos (keywords), relación más débil con los clusters más representativos (1-5). Estos clusters comprenden los siguientes temas: 'recarga de agua subterránea' (cluster 6-celeste), 'recarga' (cluster 7-naranja), 'isótopos estables del agua' (cluster 8-brown), 'zona árida' (cluster 9-violeta), 'intrusión salina y acuíferos costeros' (cluster 10-rosado), and 'precipitación' (cluster 11-verde claro).

9 METODOLOGÍA

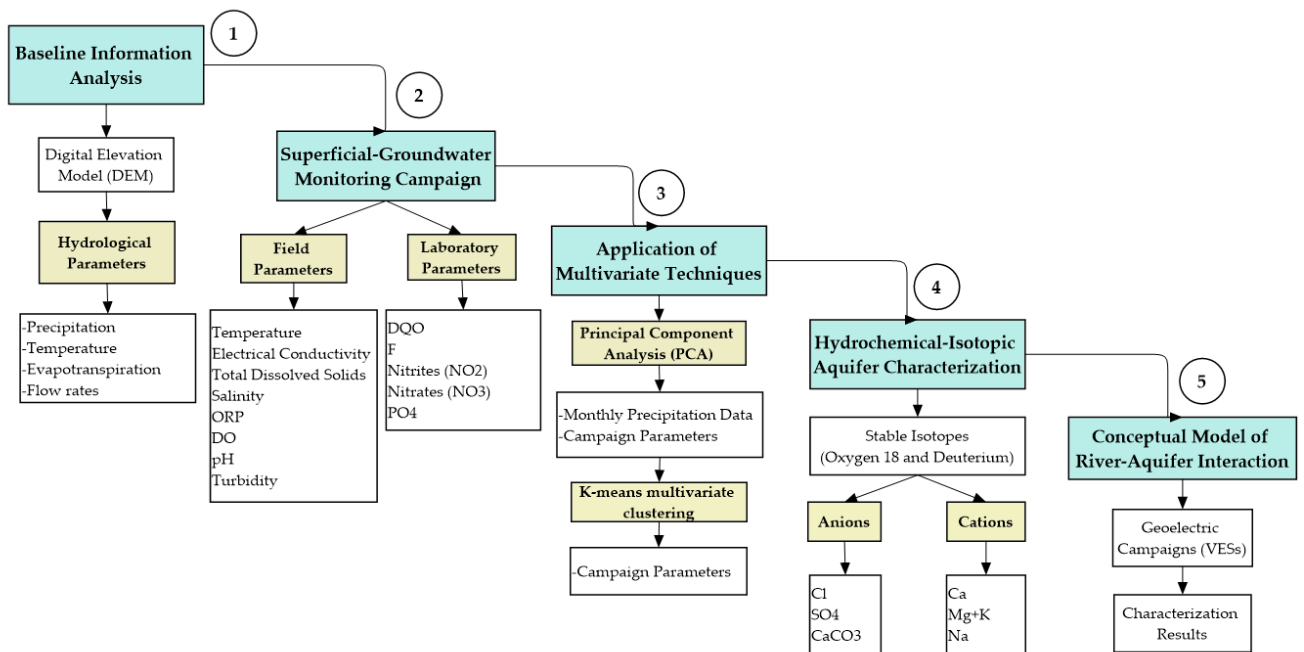
La metodología comprende las siguientes cinco fases: i) análisis de la información base, ii) monitoreo de la calidad del agua superficial-subterránea, iii) aplicación de técnicas multivariantes, iv) caracterización Hidroquímica-Isotópica del acuífero, y v) modelo conceptual de interacción río-acuífero (ver Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 6).

Esta metodología integra la caracterización hidroquímica del sistema río-acuífero, lo que incluye la medición de parámetros físico-químicos, aniones, cationes, y la representación de la química del agua mediante el diagrama de Piper (NADIRI et al., 2013; Wu et al., 2015; Q. Yang et al., 2016). Por otro lado, la caracterización isotópica

involucra el análisis de isótopos estables como $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ (Paúl Carrión-Mero, Montalván, Morante-Carballo, Heredia, et al., 2021; Huang et al., 2018; Yin et al., 2011). También, se pretende combinar estas metodologías para la generación del modelo aproximado de la interacción río-acuífero, empleando la medida de niveles piezométricos de una red de pozos (Rushton, 2007; Sanz et al., 2011; Xie et al., 2016). Finalmente, se integrará la interpretación de las campañas geoelectricas (Sondeos Eléctricos Verticales). Todo lo antes mencionado se realizará en las dos épocas estacionales para la comprensión de los procesos de recarga del sector y se representará mediante un modelo conceptual.

Explorar la interacción entre la precipitación, aguas superficiales y aguas subterráneas es un tema clave de muchos estudios relacionados con la gestión de la calidad del agua (Karlović et al., 2021; Lloyd et al., 2016). Sin embargo, comprender las interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales es complejo y requiere información climática, forma del relieve, geología y factores bióticos, que integren un marco hidrogeológico sólido (Sophocleous, 2002). Por lo tanto, este estudio busca comprender de forma preliminar la interacción río-acuífero Daule analizando información de monitoreo de parámetros físico-químicos, caracterización hidroquímica e isótopos estables del agua.



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 6. Esquema de la metodología.

9.1 Fase I: Análisis de Información Base

Esta fase comprendió la búsqueda de información de la zona de estudio, lo que incluye: mapas geológicos y topográficos, artículos científicos, informes técnicos e información de geoportales. Además, se realizó el tratamiento de información de ciertos parámetros hidrológicos como precipitaciones, caudales, ubicación de pozos de agua y cálculo de niveles piezométricos de los pozos.

Se procesaron datos históricos de precipitaciones de tres estaciones meteorológicas que se ubican en la zona de estudio: i) estación Colimes de Balzar (M0475); ii) estación Daule La Capilla (M0476), y iii) estación Vinces (M0466), cuya distribución espacial se muestra en la Fuente: SENAGUA (2012) y SIN (2014).

Figura 2 y se analizaron un periodo continuo de 16 años (2000-2015). Adicionalmente, se verificó la calidad de estos datos con una gráfica de correlación entre los datos de precipitaciones de la estación meteorológica más representativa en el acuífero (estación M0476), versus datos satelitales de CHIPRS (periodo 2000-2021).

También se generaron mapas del uso de suelo para dos años representativos (1990 y 2018), con la finalidad de evidenciar los cambios en el uso de suelo generados por la actividad antrópica, incremento de tierras agropecuarias y la falta de implementación de campañas de reforestación que atenúen los efectos de la erosión a nivel de la subcuenca del río Daule.

Finalmente se generó un mosaico de ráster para representar el Modelo Digital de Elevación (DEM) en el acuífero del río Daule, con una resolución de 3m que permitió distinguir los cambios en la elevación en el sector a pesar de ser una zona sin cambios morfológicos bruscos, lo que se verifica con la geología del sector, ya que predominan depósitos aluviales y terrazas. Así como también la presencia de planicies inundables como humedales y arrozales.

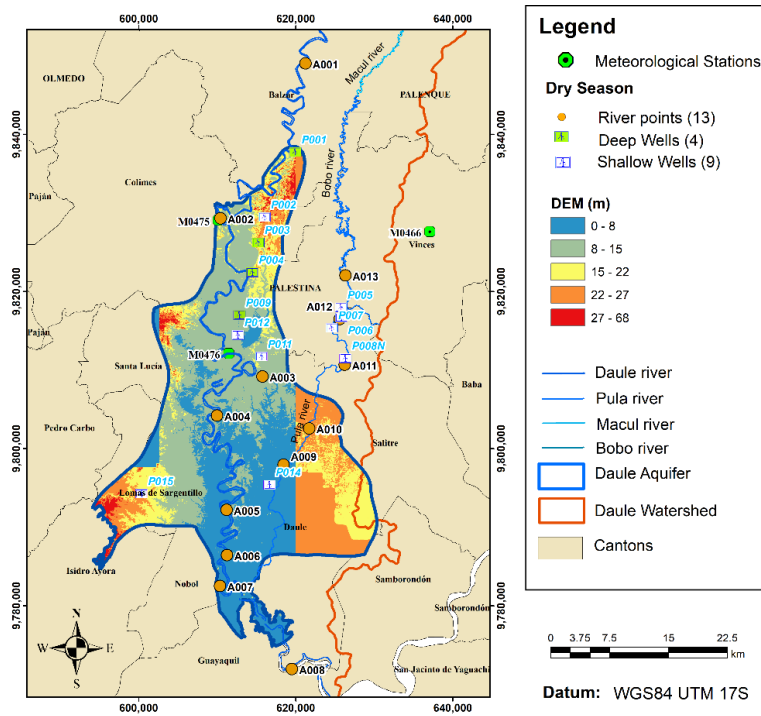
9.2 Fase II: Monitoreo de la calidad de agua superficial-subterránea

Esta fase incluyó la identificación de zonas estratégicas para obtención de muestras de agua superficial (ríos) y aguas subterráneas (pozos de agua) en la zona que comprende el acuífero del río Daule. Esto se realizó mediante salidas de campo y actualización del registro de pozos generado por SENAGUA en el 2014. La campaña

de monitoreo se realizó trimestralmente, asegurando la obtención de mediciones en época seca (ver Fuente: Elaboración propia del autor.

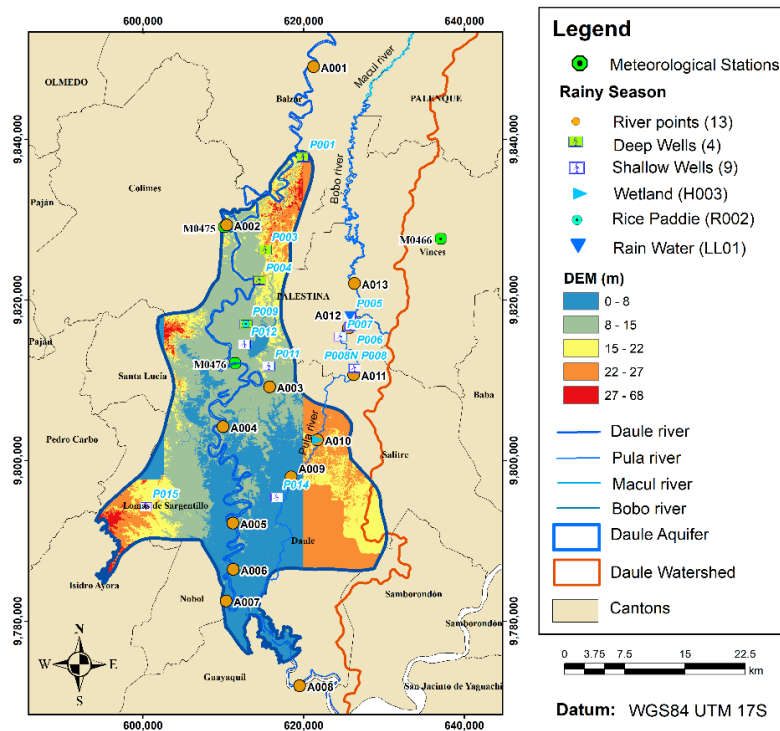
Figura 7) y lluviosa (Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 8) de parámetros físico-químicos y de laboratorio.



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 7. Distribución de puntos de muestreo en época seca.



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 8. Distribución de puntos de muestreo en época lluviosa.

Entre los parámetros in situ se incluyeron: temperatura, Electric Conductivity (EC), Total Dissolved Solids (TDS), salinidad, Oxidation Reduction Potencial (ORP), Dissolved Oxygen (DO), pH, turbidez y resistividad. Respecto a los parámetros de laboratorio se incluyeron: Demanda Química de Oxígeno (DQO), fluoruro (F), nitritos (NO_2), nitratos (NO_3), y fosfatos (PO_4). Estos parámetros fueron comparados con los límites permisibles de la normativa nacional del país para el conocimiento preliminar de la calidad del agua a nivel superficial y subterráneo.

9.3 Fase III: Aplicación de Técnicas Multivariantes

En esta fase se aplicaron técnicas multivariantes a los datos históricos de precipitación y parámetros de campo-laboratorio de las muestras de agua superficial-subterránea para el conocimiento de su distribución estacional y relaciones entre las variables.

Los factores que controlan la estructura espacial y temporal de las precipitaciones no se pueden discernir únicamente como datos cualitativos, entonces se requiere aplicar métodos estadísticos multivariantes para examinar cada componente de variación dentro de la estructura de la varianza. Por lo tanto, se aplicó el Principal Component Analysis (PCA), ya que es una técnica multivariante confiable que permite reducir y examinar la estructura de la varianza en datos (Ivosev et al., 2008). En este caso, las

precipitaciones mensuales en el periodo 2000-2015 de 3 estaciones meteorológicas del sector.

Adicionalmente, se aplicaron métodos jerárquicos que tienen por objetivo agrupar clusters para formar uno nuevo o bien separar alguno ya existente para dar origen a otros dos, de tal forma que, si sucesivamente se va efectuando este proceso de aglomeración (dendrograma) o división (clustering), se minimice alguna distancia o bien se maximice alguna medida de similitud (Forina et al., 2002).

9.4 Fase IV: Caracterización hidroquímica-isotópica del sistema río-acuífero

Esta fase consistió en el procesamiento e interpretación de las campañas de monitoreo en 13 puntos de muestro en agua superficial y 12 puntos de muestreo en agua superficial-subterránea durante la época seca (diciembre 2021) y época lluviosa (febrero 2022).

Para la caracterización hidroquímica se empleó el software INAQUAS de Microsoft Excel para generar el diagrama de Piper. Este análisis utiliza los aniones (Cl, HCO₃, SO₄) y los cationes (Ca, Mg, K, Na). Estos datos se analizaron en agua superficial-subterránea para el reconocimiento de la tipología del agua en función de los iones representativos empleados. También se representó el diagrama de la relación de los iones trazadores (Cl/Br) para la determinación de la calidad del agua subterránea, identificación de zonas de recarga, posible presencia de intrusión salina, rocas evaporíticas, actividad antropogénica, entre otros.

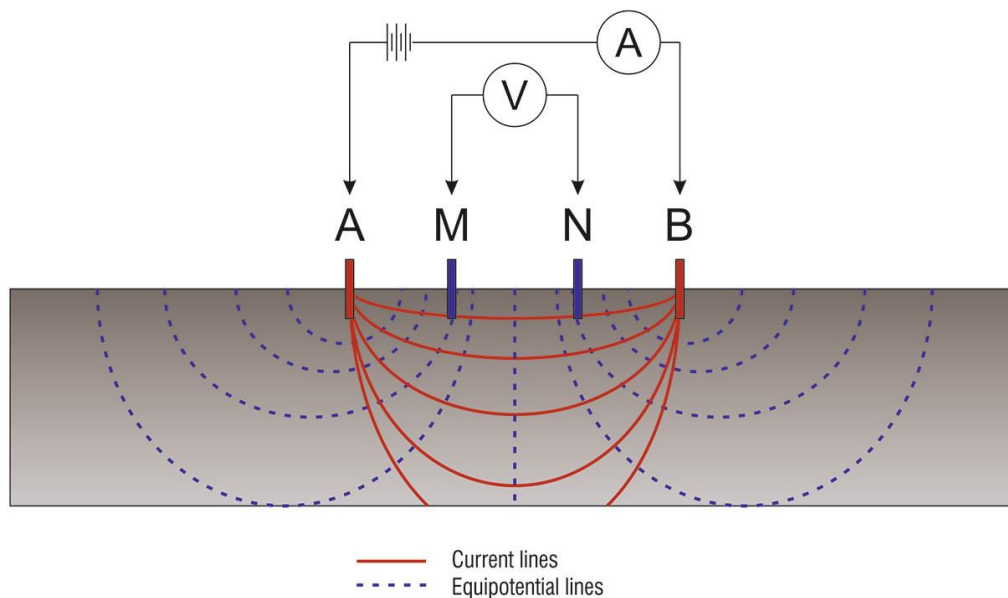
Finalmente, para la caracterización isotópica se consideró el análisis de isótopos estables del agua (¹⁸O y ²H) con la finalidad de identificar la química del agua, procesos de recarga y comportamiento hidrológico del sistema río-acuífero.

9.5 Fase V: Modelo conceptual de interacción río-acuífero

Esta fase se utilizó la información obtenida de las campañas de monitoreo de agua en época seca y lluviosa, que incluyeron la medición de parámetros de campo y laboratorio en agua subterránea (pozos) y en el cauce de los ríos principales (río Daule y río Pula). También se utilizó la información del balance de parámetros hidrológicos en el periodo 2000-2021, que incluyeron datos de precipitación, recarga, evapotranspiración y temperatura.

Se incluyó la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs), utilizando la configuración Schlumberger. En esta configuración se consigue alcanzar una profundidad teórica de $AB/3$, donde AB son los electrodos externos (ver Fuente: (EVEREST Geophysics, 2022)

Figura 9). Los SEVs permitieron identificar las zonas potenciales de agua subterránea en el sector. En campo se midió la resistencia de los materiales del subsuelo, cuyo valor al ser multiplicado por unas constantes geoelectricas (K) permitieron calcular la resistividad aparente (ρ) de estos materiales, cuyos valores se correlacionaron con la geología del sector. Se obtuvieron las curvas de resistividad aparente, que consiste en graficar la resistividad versus $AB/2$, para lo cual se empleó el software libre IPI2win, considerando un error máximo del 10% (IRIS Instruments, 2022).



Fuente: (EVEREST Geophysics, 2022)

Figura 9. Representación de la configuración Schlumberger para SEVs.

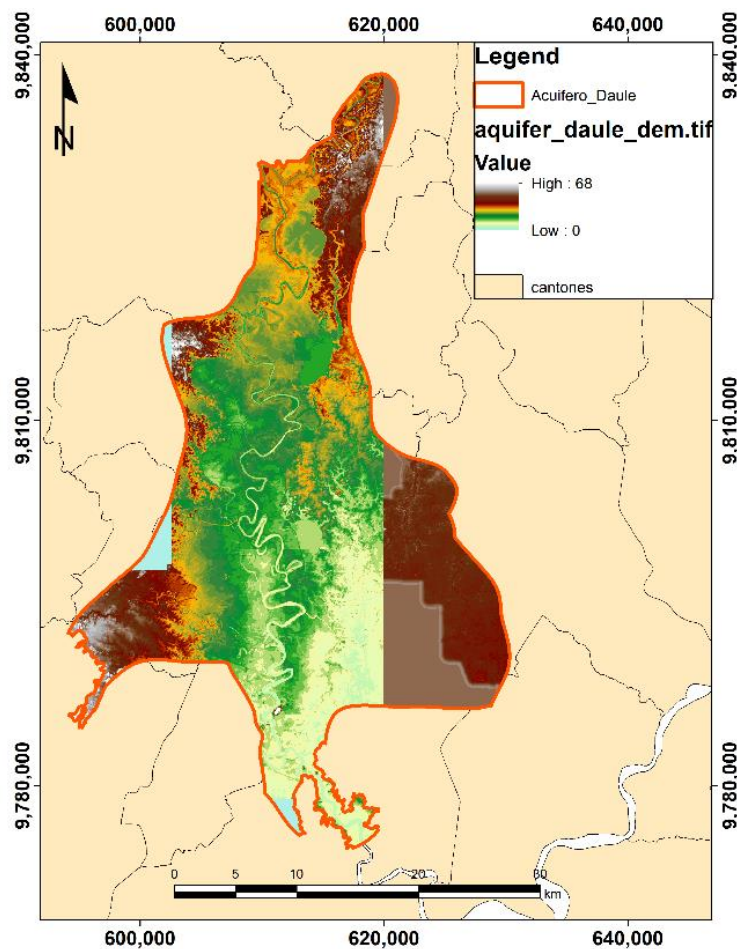
También se incluyeron los resultados del análisis hidroquímico donde se identificó la química del agua a nivel espacial, la relación Cl/Br donde se identificaron las zonas de recarga, los isótopos estables del agua (^{18}O y 2H) medidos en el agua del río y pozos. Así como también los niveles piezométricos obtenidos a partir de las mediciones de los niveles estáticos de los pozos de agua y de esta forma conocer el sentido del movimiento del flujo de agua subterránea. Con toda esta información se generó un modelo conceptual de la interacción río-acuífero.

10 RESULTADOS

10.1 Procesamiento de Digital Elevation Model (DEM)

Se generó un mosaico de los DEM en formato raster (resolución 3mx3m, proveniente de ortofotos y SIGAGRO) que pertenecen a la zona de estudio. Posteriormente, se realizó un clip del DEM con el shapefile de la delimitación del acuífero del río Daule. Finalmente, se aplicó una herramienta de ArcGIS denominada 'fill' para el relleno de vacíos del DEM resultante que se muestra en la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 10.



Fuente: Elaboración propia del autor.

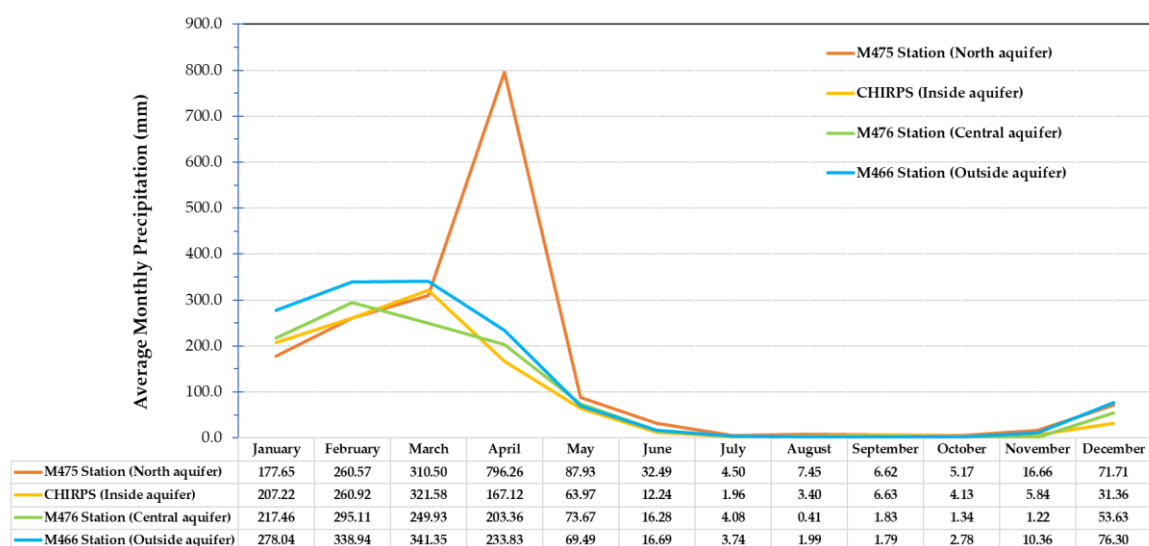
Figura 10. DEM de la zona de estudio

10.2 Análisis de la Información hidrológica

En el acuífero del río Daule se recopiló información de las precipitaciones de tres estaciones meteorológicas: i) estación 'Colimes de Balzar' (M0475); ii) estación 'Daule La Capilla' (M0476), y iii) estación 'Vinces' (M0466). También se calculó las

precipitaciones medias mensuales de estas estaciones en el periodo 2000-2015, que son los años con datos continuos de precipitaciones. Adicionalmente, se incluyó en este análisis información satelital de precipitaciones, específicamente del satélite CHIRPS, con la finalidad de verificar la información de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio (ver Fuente: Adaptado de (FAO, 2021; INAHMI, 2020)

Figura 11). Se observa que el rango de precipitaciones durante la época lluviosa (enero-abril) está entre 115 y 280 mm, a excepción de la estación M475, donde se llega a precipitaciones de aproximadamente 800mm. Sin embargo, esta estación se encuentra en la parte norte del acuífero, por lo que recibe el aporte de las precipitaciones de la parte alta de la subcuenca del río Daule, e influenciada también por la represa Daule-Peripa. Finalmente, en la época seca (mayo-diciembre) las precipitaciones oscilan entre 0.4 y 87 mm.



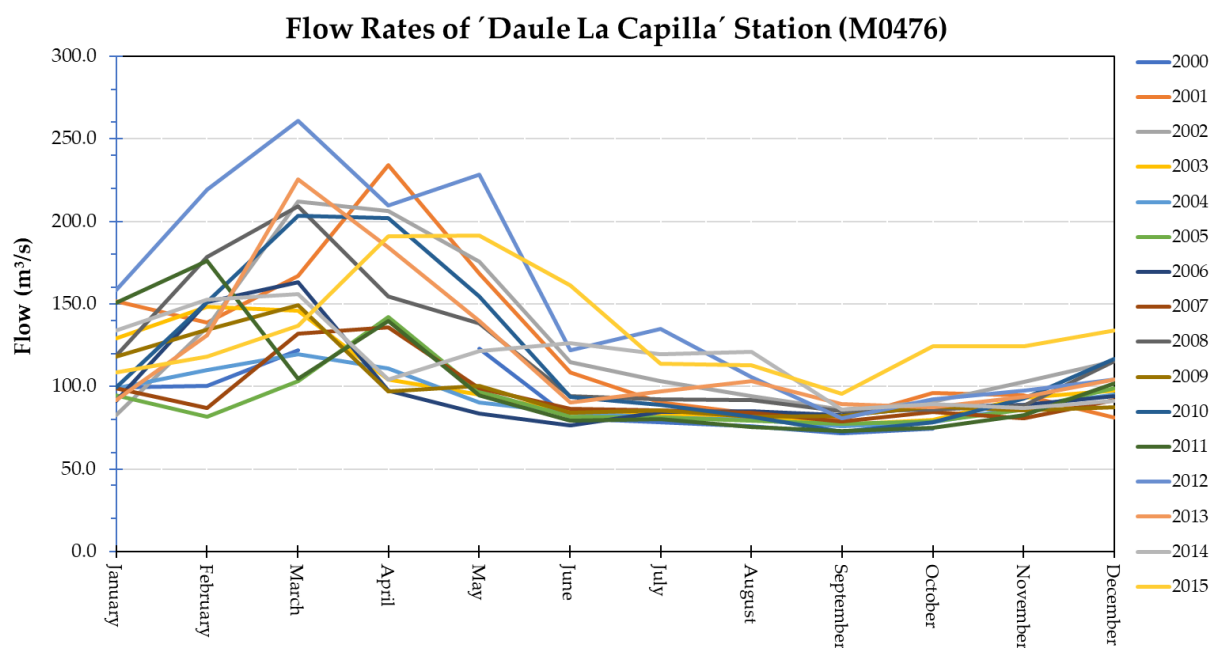
Fuente: Adaptado de (FAO, 2021; INAHMI, 2020)

Figura 11. Precipitaciones medias mensuales para las estaciones M0475, M476, M466 y para datos CHIRPS en el periodo 2000-2015.

El caudal promedio máximo del río Daule es ~1000 m³/s y el promedio mínimo sobre los 100 m³/s. El río es de leve pendiente, del orden del 0.2% al 0.05%, por lo que la influencia de la marea llega a unos 70 km aguas arriba de Guayaquil hasta el sitio conocido como la Capilla. En época lluviosa (enero-abril), la corriente del río se dirige hacia el río Guayas, pero en estación seca, algunos ríos tributarios prácticamente tienen cero de aportación al río Daule y la corriente se invierte en marea alta (Huayamave, 2013).

Los caudales del río Daule entre 1964 y 1988 varían en el rango entre 7 y 1450 m³/s (Huayamave, 2013; INAHMI, 2020). En la Fuente: Adaptado de (INAHMI, 2020)

Figura 12 se observa el comportamiento del caudal de la estación hidrológica Vinces (M0466), durante 16 años consecutivos (2000-2015). Como resultado, se evidencia que en la época lluviosa (enero-abril) los caudales están en el rango entre 75 y 260 m³/s. Mientras que, en la época seca (mayo-diciembre) mayormente predominan valores entre 75 y 130 m³/s.



Fuente: Adaptado de (INAHMI, 2020)

Figura 12. Caudales mensuales de la estación M0466 en el periodo 2000-2015.

Posteriormente, se calculo el coeficiente de correlación entre los datos de la estación meteorológica más representativa de la zona de estudio respecto a los datos satelitales CHIRPS. Se observa que se consiguió una excelente correlación entre estos datos ($R^2=0.94$), permitiendo utilizar datos satelitales actualizados para el cálculo del balance anual de parámetros hidrológicos para el periodo entre 2000 y 2021, como se observa en la Figura 13.

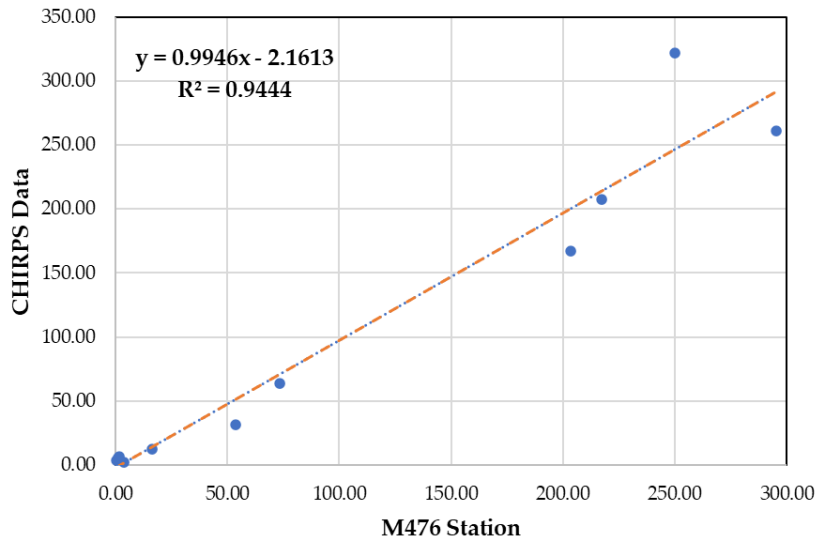
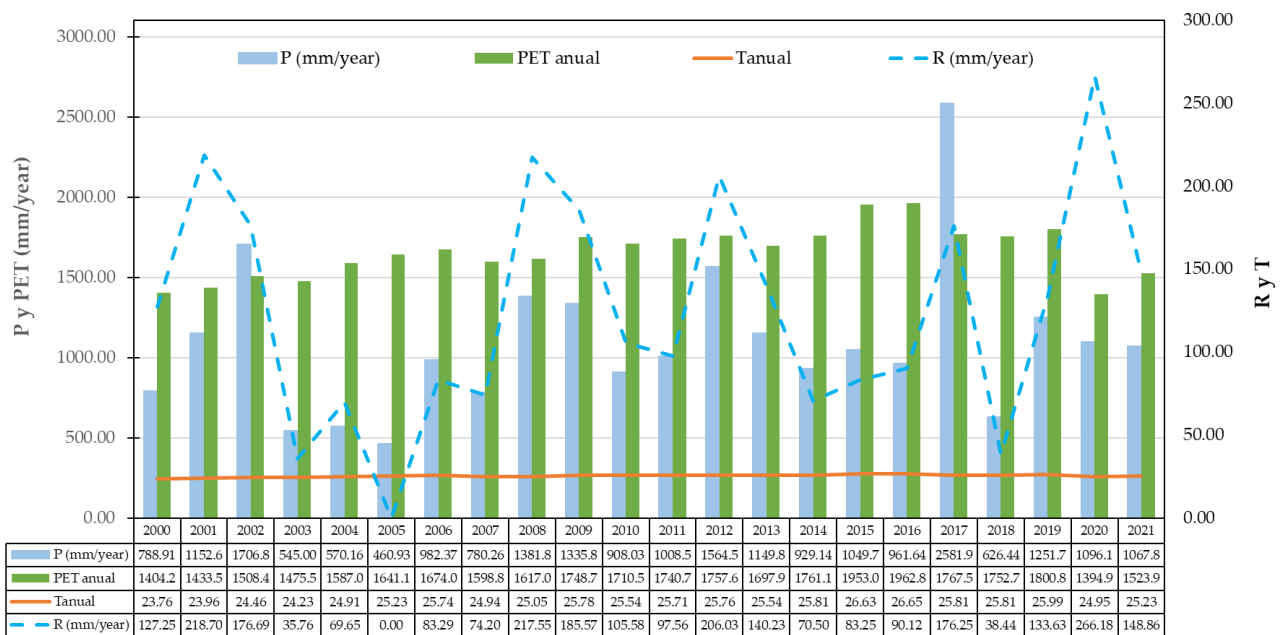


Figura 13. Análisis de consistencia de los datos de precipitación de estación meteorológica versus datos satelitales.

Se generó un balance a partir de los datos mensuales de Precipitación (P) y Temperatura (T) para calcular la recarga y Evapotranspiración Potencial (ETP) a escala anual durante el periodo 2000-2021, empleando el software libre de Microsoft Excel denominado Easy Balance, como se observa en la Fuente: Adaptado de (FAO, 2021)

Figura 14. Como resultado, se observa que la ETP predomina sobre la precipitación, demostrando los problemas de erosión en la zona. Adicionalmente, en los últimos años la recarga se incrementó, ya que la principal fuente de recarga del acuífero son las precipitaciones locales.

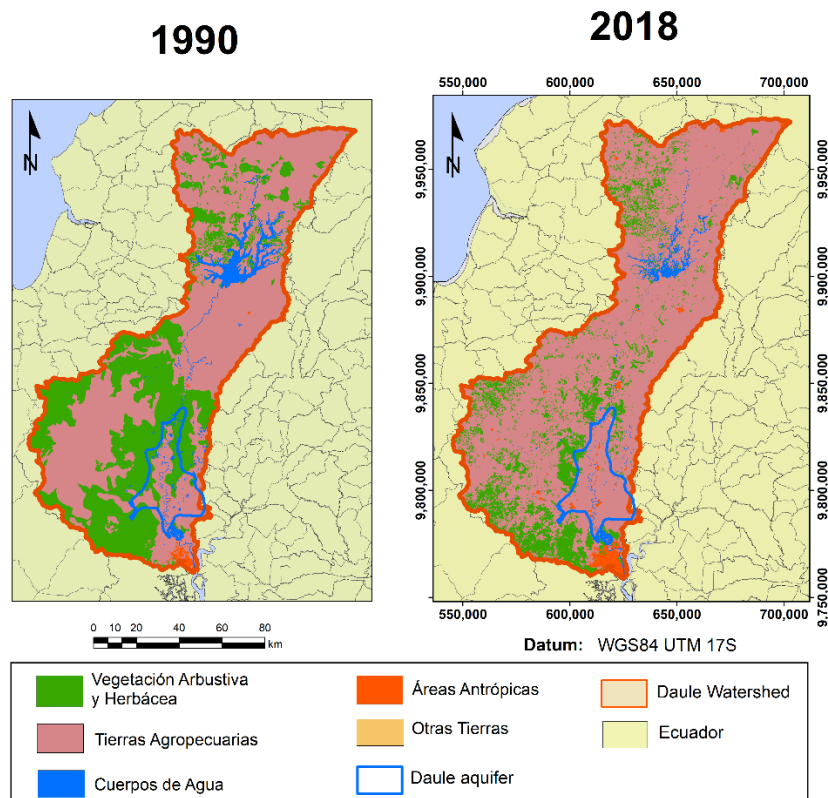


Fuente: Adaptado de (FAO, 2021)

Figura 14. Parámetros Hidrológicos en el periodo 2000-2021

Finalmente, en la Fuente: Adaptado de (CIPAT-ESPOL; SENAGUA; & AECID, 2014; Ministerio del Ambiente & Consejo Nacional de Recursos Hídricos, 2002)

Figura 15 se representa los cambios en el uso de suelo en un periodo de 28 años entre 1990 y 2018. Se evidencia que, en el 2018, la cobertura de tierras agrícolas se ha potenciado notablemente, alcanzando una cobertura de aproximadamente el 95% del acuífero del río Daule. Mientras que en 1990, únicamente el 40% del acuífero eran tierras agrícolas.



Fuente: Adaptado de (CIPAT-ESPOL; SENAGUA; & AECID, 2014; Ministerio del Ambiente & Consejo Nacional de Recursos Hídricos, 2002)

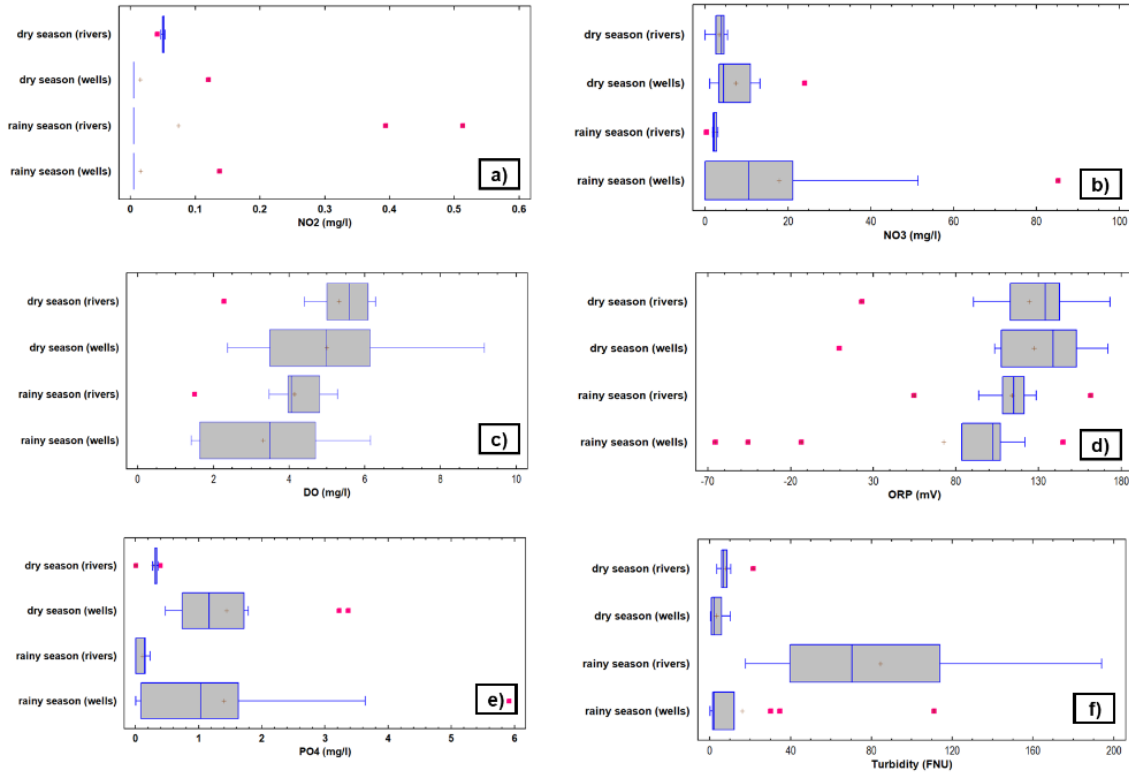
Figura 15. Cambios en el uso de suelo en 1990 y 2018 en la subcuenca del río Daule

10.3 Monitoreo de la calidad del agua superficial-subterránea

En la Fuente: Elaboración propia del autor.

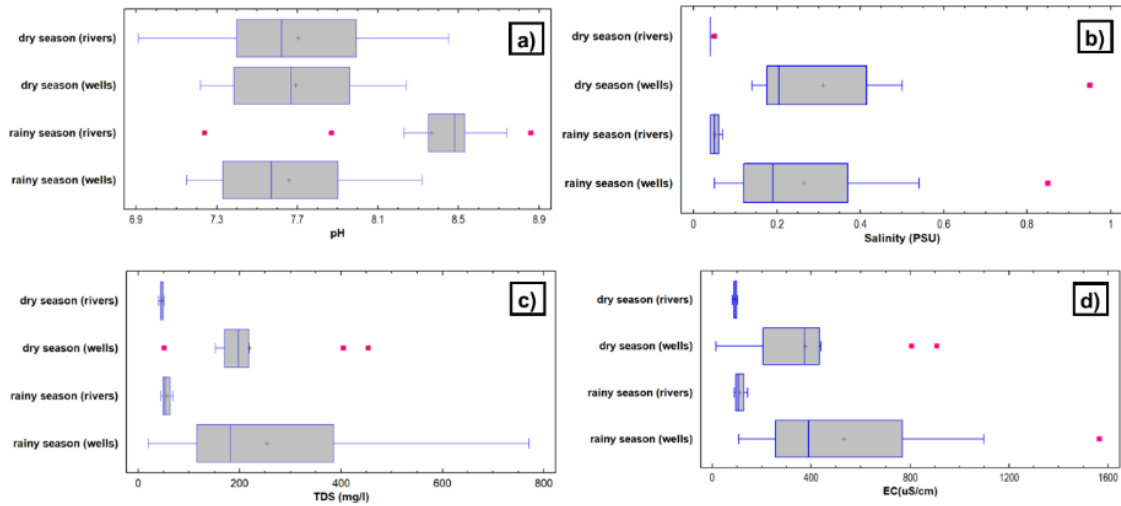
Figura 16 se observan los análisis del muestreo para los parámetros como: Nitritos (NO_2), Nitratos (NO_3), Dissolved Oxygen (DO), Oxidation Reduction Potential (ORP), Fosfatos (PO_4) y Turbidez. Así también, en la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 17 se presentan los resultados de los parámetros: pH, salinidad, Total Dissolved Solids (TDS) y Electric Conductivity (EC).



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 16. Resultados de monitoreo de NO₂, NO₃, DO, ORP, PO₄ y Turbidez para muestras de agua superficial-subterránea. Nota: mili voltios (mV).



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 17. Resultados de monitoreo de pH, salinidad, TDS y EC para muestras de agua superficial-subterránea. Nota: PSU: Practical Salinity Units.

En la Tabla 1 se presentan los valores medios de los parámetros medidos en el agua superficial para las dos épocas estaciones y sus respectivos límites permisibles según la normativa nacional de Ecuador, el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA).

Tabla 1. Valores de los parámetros para agua superficial-subterránea

| Parámetro | Media | Máximo | Media | Máximo | Límite Permissible del TULSMA |
|------------------------------|------------------|---------|--------------|--------|---|
| | (época lluviosa) | | (época seca) | | |
| NO ₂ (mg/l) ríos | 0.074 | 0.513 | 0.0494 | 0.053 | NO ₂ <=1 mg/l |
| NO ₂ (mg/l) pozos | 0.0151 | 0.137 | 0.0145 | 0.12 | |
| NO ₃ (mg/l) ríos | 2.2018 | 3.062 | 3.4151 | 5.351 | NO ₃ <=10 mg/l |
| NO ₃ (mg/l) pozos | 17.83 | 85.198 | 7.4192 | 24.016 | |
| DO (mg/l) ríos | 4.1353 | 5.28 | 5.3153 | 6.28 | DO <=3 mg/l |
| DO (mg/l) pozos | 3.3130 | 6.15 | 4.99 | 9.16 | |
| ORP (mV) ríos | 113.892 | 161.5 | 124.5 | 173.3 | 300 < ORP < 500 |
| ORP (mV) pozos | 72.6846 | 144.7 | 127.4 | 171.9 | aguas saludables |
| PO ₄ (mg/l) ríos | 0.1077 | 0.228 | 0.2805 | 0.394 | 0.1 < PO ₄ < 0.2 |
| PO ₄ (mg/l) pozos | 1.3969 | 5.915 | 1.4425 | 3.365 | inicios de eutrofización |
| T (FNU) ríos | 84.4308 | 194.0 | 7.8923 | 21.4 | T<=100 FNU |
| T (FNU) pozos | 16.0154 | 111.0 | 3.2833 | 10.1 | |
| pH (ríos) | 8.3661 | 8.86 | 7.7046 | 8.45 | 6 <pH < 9 |
| pH (pozos) | 7.6584 | 8.32 | 7.6925 | 8.24 | |
| S (PSU) ríos | 0.0507 | 0.07 | 0.0423 | 0.05 | S< 0.5: agua dulce |
| S (PSU) pozos | 0.3108 | 0.85 | 0.2638 | 0.95 | 0.5<S<30: agua salobre S>30: agua salina |
| TDS (mg/l) ríos | 54.6154 | 68.0 | 46.1538 | 51.0 | TDS <=450 mg/l |
| TDS (mg/l) pozos | 252.769 | 771.0 | 219.667 | 454.0 | |
| EC (uS/cm) ríos | 110.231 | 144.0 | 92.3846 | 102.0 | EC <=700 uS/cm |
| EC (uS/cm) pozos | 531.692 | 1565.00 | 386.925 | 908 | |

Nota: S: Salinidad; T: Turbidez; FNU: Formazin Nephelometric Unit.

Como resultado, los nitritos cumplen con los Límites Permisibles (LP) de la normativa nacional para uso pecuario (NO₂<1mg/l). Mientras que, los nitratos exceden los valores permitidos (NO₃<10mg/l), lo cual evidencia el efecto de los fertilizantes nitrogenados en este sector, donde predominan las actividades agropecuarias, como el sembrío de arrozales. Así también, el oxígeno disuelto supera los LP (DO <=3mg/l).

Por otro lado, la turbidez excede los LP para consumo humano únicamente en el agua superficial, durante la época lluviosa (Turbidez <=100 FNU) (MAE, 2015). El pH se encuentra en los valores permitidos por la normativa nacional para uso pecuario (6<pH<9).

La salinidad en su mayoría corresponde a agua dulce ($S < 0.5$ PSU). Sin embargo, en agua subterránea existe evidencia de agua salobre ($0.5 < S < 30$ PSU).

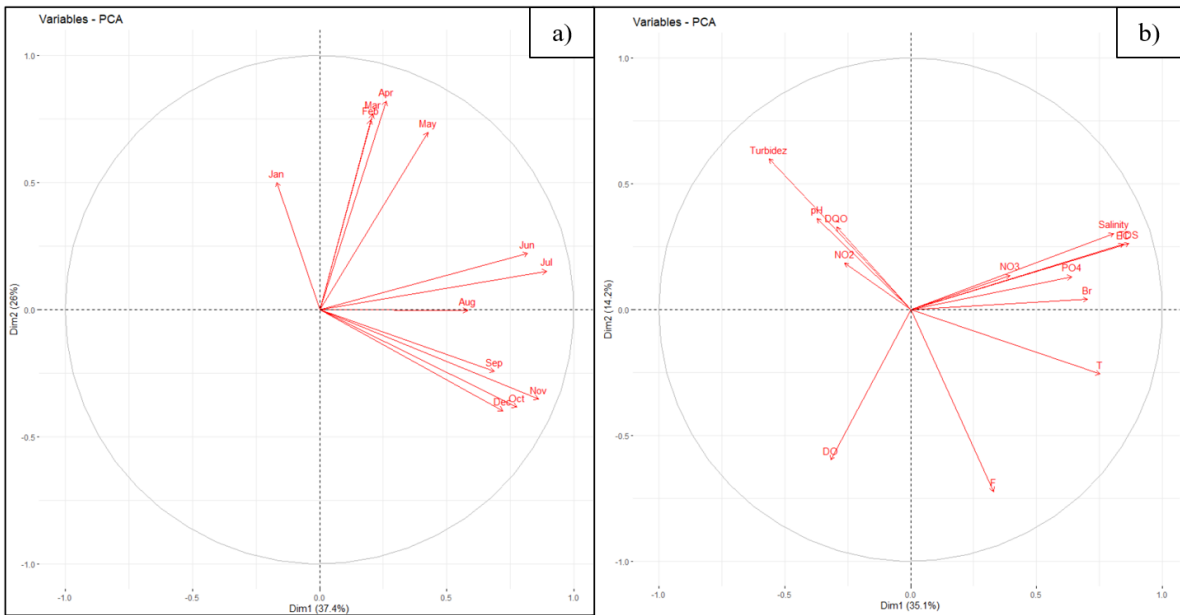
Respecto a los TDS, la mayoría de los valores son inferiores a 450 mg/l, es decir, no presentan restricciones para riego. La EC cumple con los límites permisibles en agua superficial. Sin embargo, en agua subterránea exceden los 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ admitidos para riego (MAE, 2015). Respecto a los fosfatos se observa que superan los 0.1 mg/l, indicando procesos de eutrofización a nivel de agua superficial y subterránea.

Los valores bajos de ORP ocurren cuando el oxígeno disuelto es bajo e incrementa la toxicidad de ciertos metales y contaminantes. También existen muchas sustancias muertas y material en descomposición en el agua que no puede ser limpiado o descompuesto, representando un entorno no saludable para peces o insectos. En aguas saludables, el ORP debería estar entre 300 y 500 mV (J. Horne & Remington Goldman, 1994). Sin embargo, en la zona de estudio para agua superficial en época lluviosa se tienen valores de ORP que oscilan entre 125 y 175 mV, lo que indica aguas no saludables. Reducir el pH a 6,0 aumenta el ORP, ya que hay más ácido hipocloroso (HOCl) disponible. Mientras que, elevar el pH a 8,0 reduce el valor de ORP, ya que hay más iones de hipoclorito (OCl^-) presentes (Suslow, 2004).

10.4 Aplicación de Técnicas Multivariantes

Se aplicó la técnica de Principal Component Analysis (PCA) en datos de precipitaciones históricas de la zona de estudio y en los parámetros de campo-laboratorio del sistema río-acuífero respectivamente (ver Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 18). La Figura 18a pone en evidencia el comportamiento bimodal de la subcuenca del río Daule, comprobándose la existencia de dos épocas de estaciones diferenciadas: época lluviosa (enero-mayo) y época seca (mayo-diciembre). Por otro lado, en la Figura 18b se observa la relación entre las variables de campo y laboratorio de aguas superficiales-subterráneas. Como resultado, la salinidad, conductividad eléctrica y TDS presentan una relación directa. Mientras que, tienen una relación inversa con el pH, la turbidez, NO_2 y DQO.

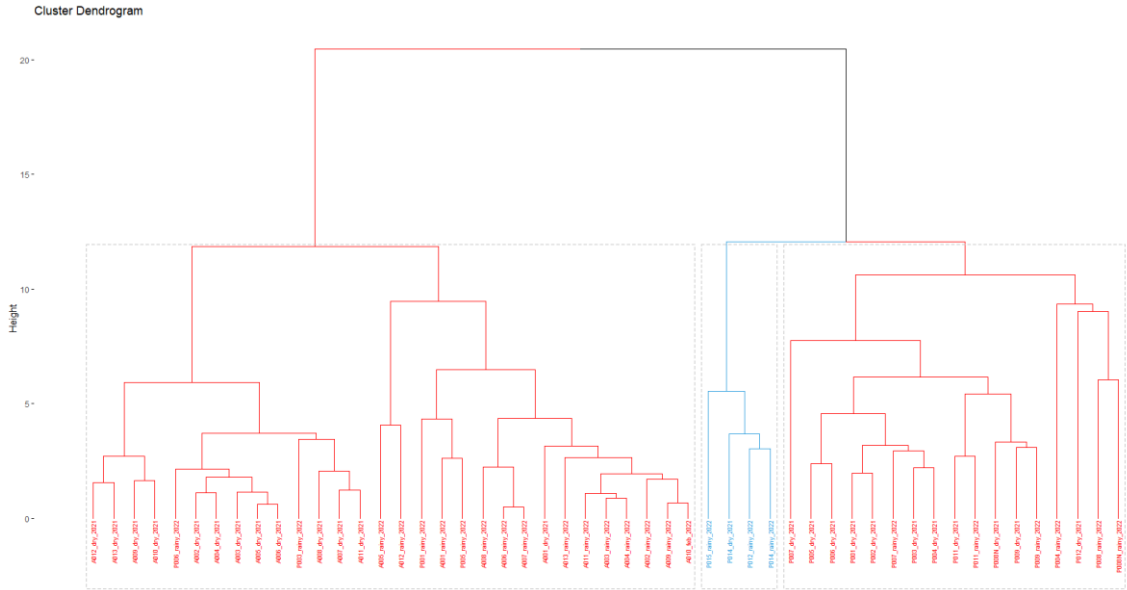


Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 18. Aplicación de Principal Component Analysis (PCA). a) PCA en Precipitaciones, b) PCA en parámetros de campo y laboratorio de agua superficial-subterránea.

En la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 19 se observa la aplicación del método jerárquico de agrupación por clusters (dendrograma). Como resultado, se observan 9 clusters, donde los 4 grupos más representativos están asociados los datos de río en época seca (rojo), ríos y pozos en época lluviosa (celeste), pozos en época seca (negro) y pozos 5, 14, 12 en época lluviosa (verde).



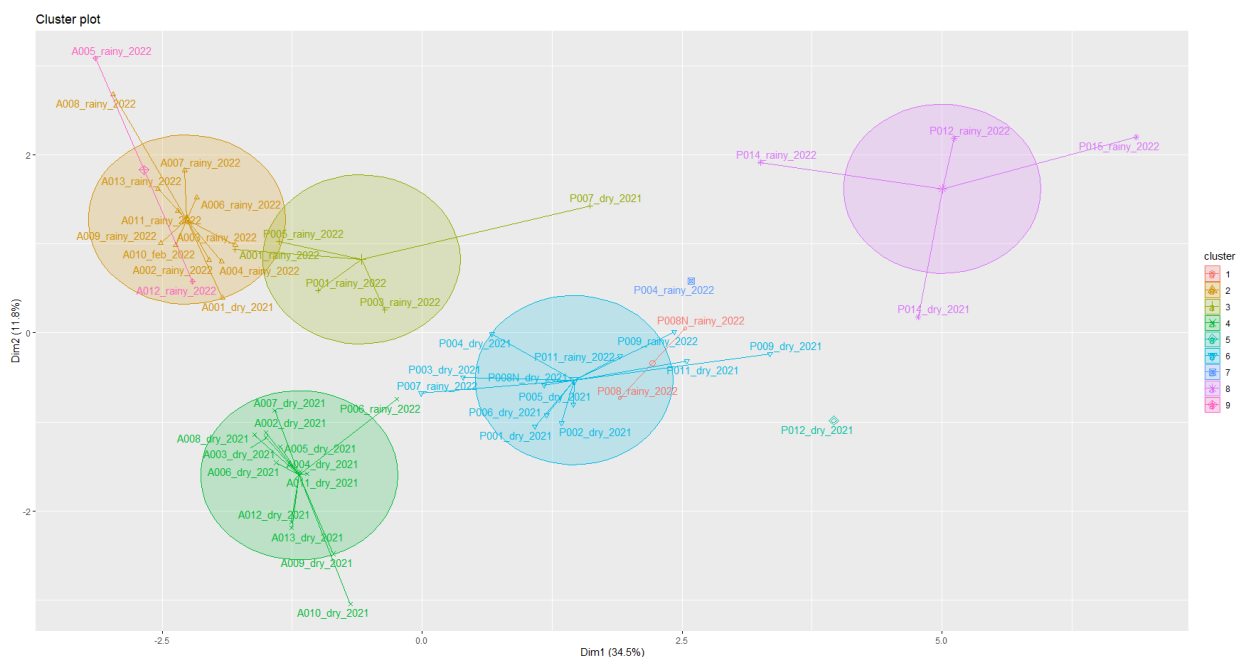
Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 19. Dendrograma de las campañas de muestreo en pozos y ríos

En la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 20 se observa el gráfico de cluster que permitió incrementar la relación de similitud entre las variables analizadas, considerando su distribución espacial y temporal (época estacional). De los 9 clusters resultantes, existen dos agrupaciones representativas, los cluster 1, 2, 3, 8 y 9 incluyen la mayoría de los puntos de muestro de agua superficial y subterránea de la época lluviosa. Con respecto a la época se agrupan en los clusters 4, 5, 6 y 7.

- Cluster 1: dos muestras de río en época lluviosa (A012 y A005)
- Cluster 2: nueve muestras de ríos en época lluviosa (A003, A004, A006, A007, A008, A009, A010, A011 y A013).
- Cluster 3: cuatro muestras de pozos (pozo #1 y #3: acuífero Daule), (pozo #5 y #7: en el río Pula) y una muestra de río A001 en época lluviosa.
- Cluster 4: doce muestras de ríos en época seca (A002 al A013) y Pozo 6 en época lluviosa
- Cluster 5 y 6: doce muestras de pozos en época seca (P001 al P012) y Pozos 7 y 11 en época lluviosa
- Cluster 7: Pozo 4 en época lluviosa
- Cluster 8: pozos 12, 14 y 15 en época lluviosa y Pozo 14 en época seca (pozos ubicados en la parte baja del acuífero)
- Cluster 9: pozo 8 y 8N en época lluviosa, ubicado en el límite del cluster 6



Fuente: Elaboración propia del autor.

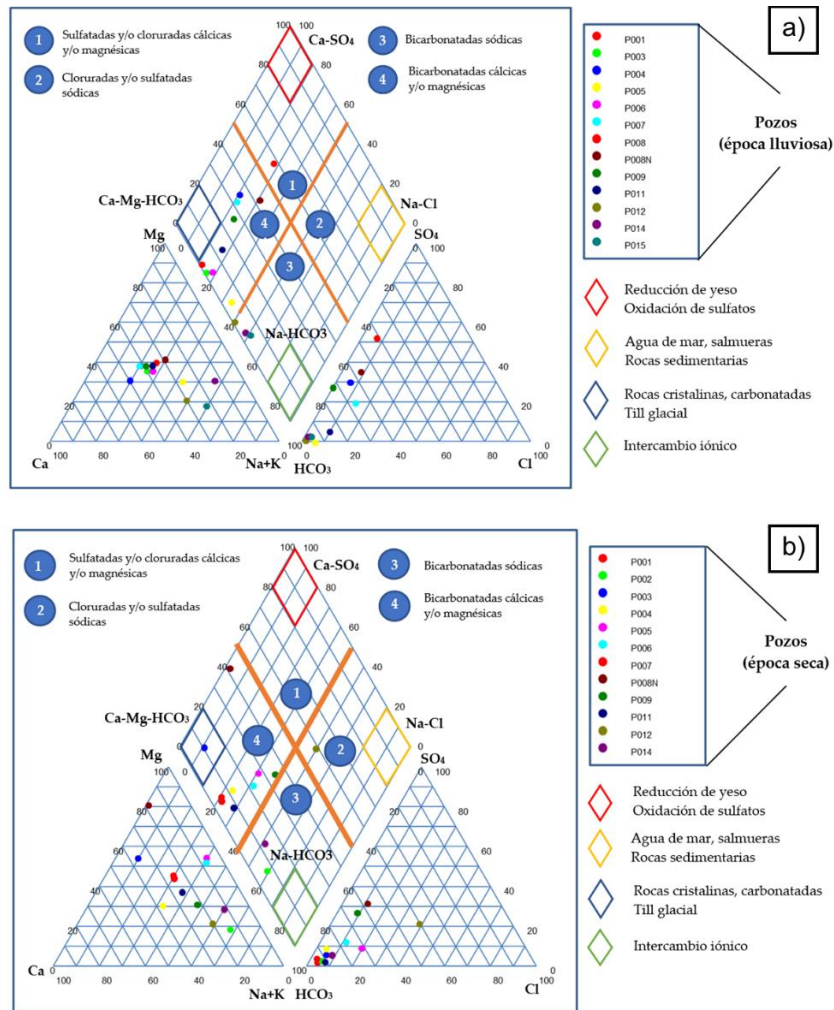
Figura 20. K-means multivariate clustering, método Euclidean de las campañas de muestreo en pozos y ríos

10.5 Caracterización hidroquímica-isotópica del sistema río-acuífero

Se seleccionaron 54 muestras distribuidas en 26 muestras de agua superficial, 25 muestras de agua subterránea (pozos), 1 muestra de arrozal, 1 muestra de humedal y una muestra de agua de lluvia. Posteriormente, el diagrama de Piper (1953) se utilizó para la caracterización hidroquímica del sistema hidrogeológico, considerando aniones (Cl , SO_4 , HCO_3) y cationes (Na , K , Mg y Ca). El diagrama de Piper traza la concentración de los porcentajes de agua de los iones mayoritarios en un diagrama triangular, donde cada punto corresponde a una muestra (Piper, 1944). En la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 21a se muestra el análisis para el agua subterránea en época seca y en la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 21b en época lluviosa. El agua subterránea del sector se clasifica como aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas. En época seca se tiene evidencia de rocas cristalinas-carbonatadas por la presencia de arenas que contienen cristales de cuarzo principalmente.



Fuente: Elaboración propia del autor.

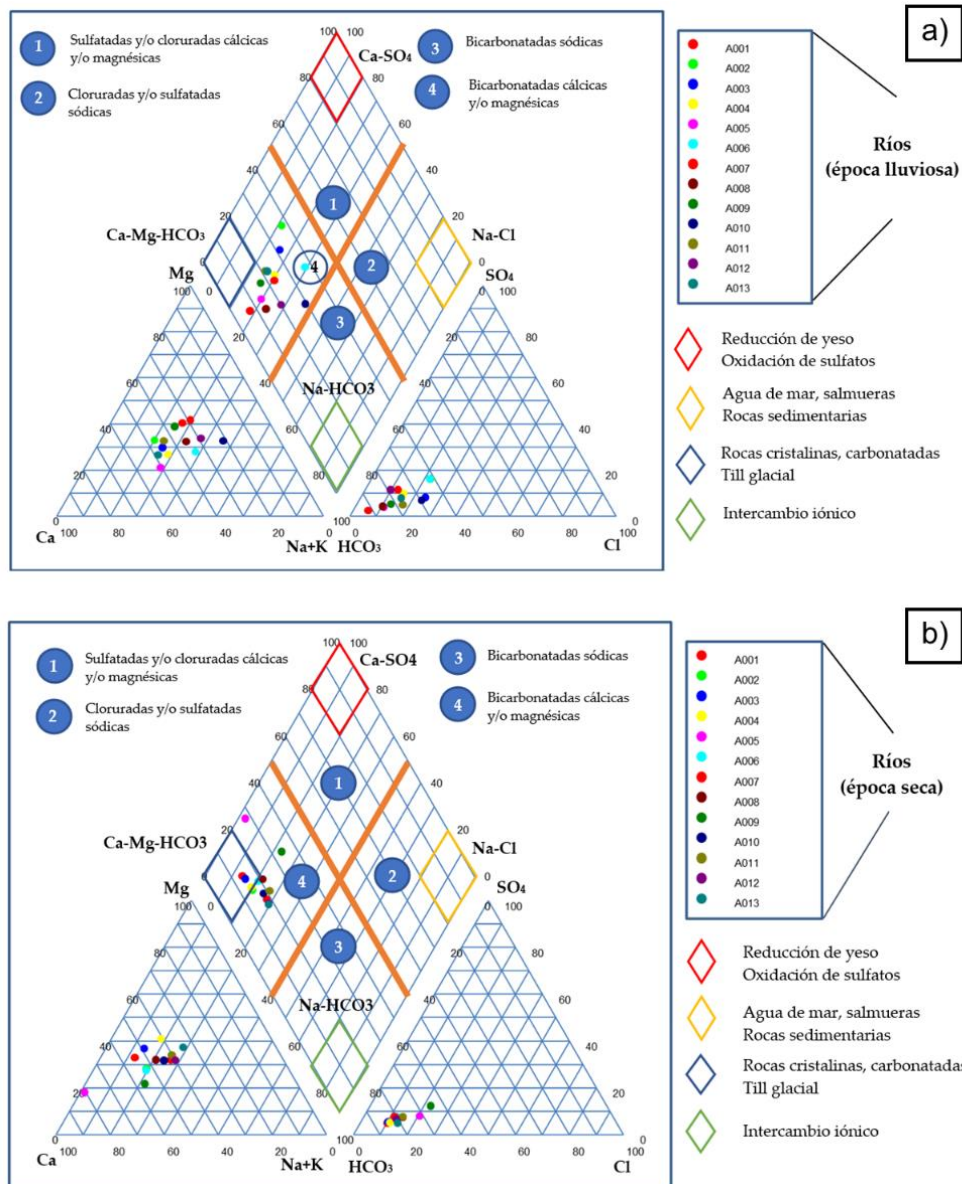
Figura 21. Caracterización hidroquímica en agua subterránea. a) en época lluviosa y b) en época seca.

En la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 22 se observa la caracterización hidroquímica en agua superficial, tanto en época seca (Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 22a), como en época lluviosa (Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 22b). Como resultado, se observa que el agua superficial también se encuentra en el tipo 1 que corresponde a aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas, verificando la química del agua en el sector.



Fuente: Elaboración propia del autor.

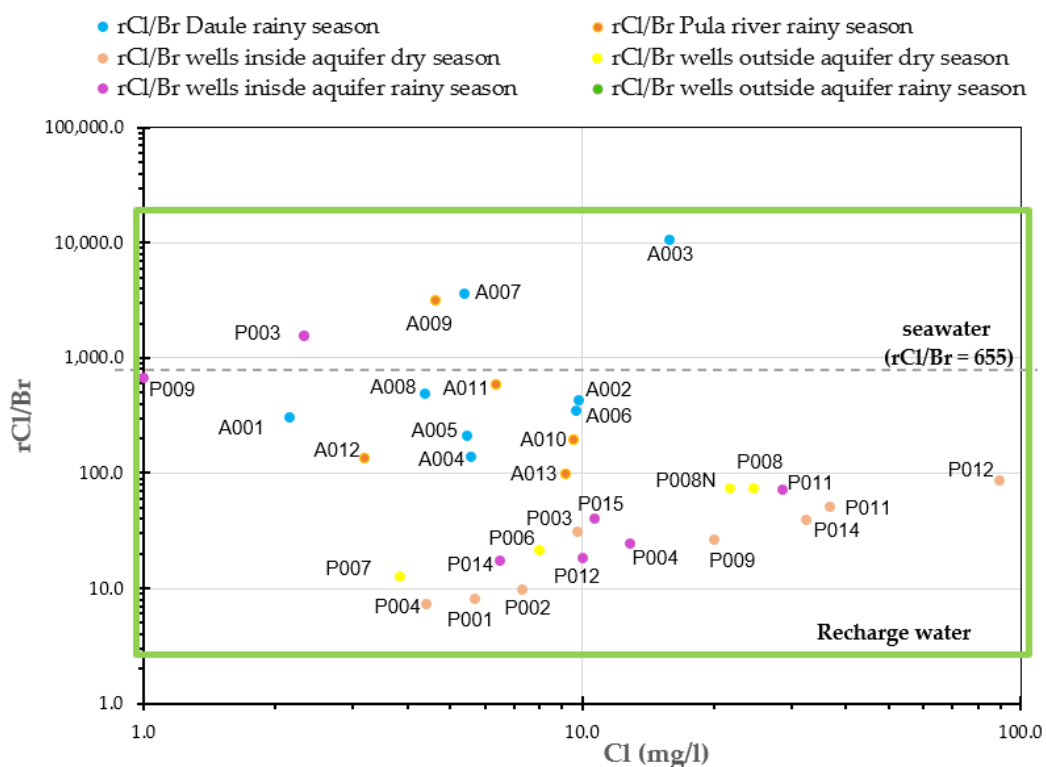
Figura 22. Caracterización hidroquímica en agua superficial. a) en época lluviosa y b) en época seca.

Las características químicas de una masa de agua superficial natural o un flujo de agua subterránea registran información sobre el origen de los componentes químicos de la masa de agua y sus interacciones con otras partes del ciclo hidrológico (Cai et al., 2020; Guo et al., 2019). Las variaciones espaciotemporales y evolución de la hidroquímica de las aguas subterráneas pueden evaluarse con análisis hidroquímicos (Wang et al., 2021), como se lo realizó en este estudio mediante el diagrama de Piper, que incluye aniones y cationes de las muestras de agua superficial-subterránea. Como

resultado, se evidenció que la tipología de agua predominante en el sector son aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas.

En la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 23 se muestra el radio de la relación de los iones Cloruro y Bromuro. Estos iones presentan un comportamiento próximo al trazador ideal. Por lo tanto, son indispensables en la identificación de fuentes de recarga, agua marina, entre otras. En la zona de estudio se identificó principalmente agua de recarga. Generalmente, se puede identificar contaminación por actividad antropogénica o evidencia de intrusión salina, como se ha evidenciado en el caso de Manglaralto-Ecuador (Paúl Carrión-Mero, Montalván, Morante-Carballo, Heredia, et al., 2021). Sin embargo, los datos de este trabajo no presentan concentraciones de Cl superiores a los 100 mg/l y la relación Cl/Br no supera los 10000 mg/l. Por lo tanto, esto indica que el sistema río-acuífero no está fuertemente afectado por los factores antropogénicos, pero estos análisis deben seguir monitoreándose porque es una manera de conocer el estado del agua y tomar acciones de prevención en la gestión del recurso.

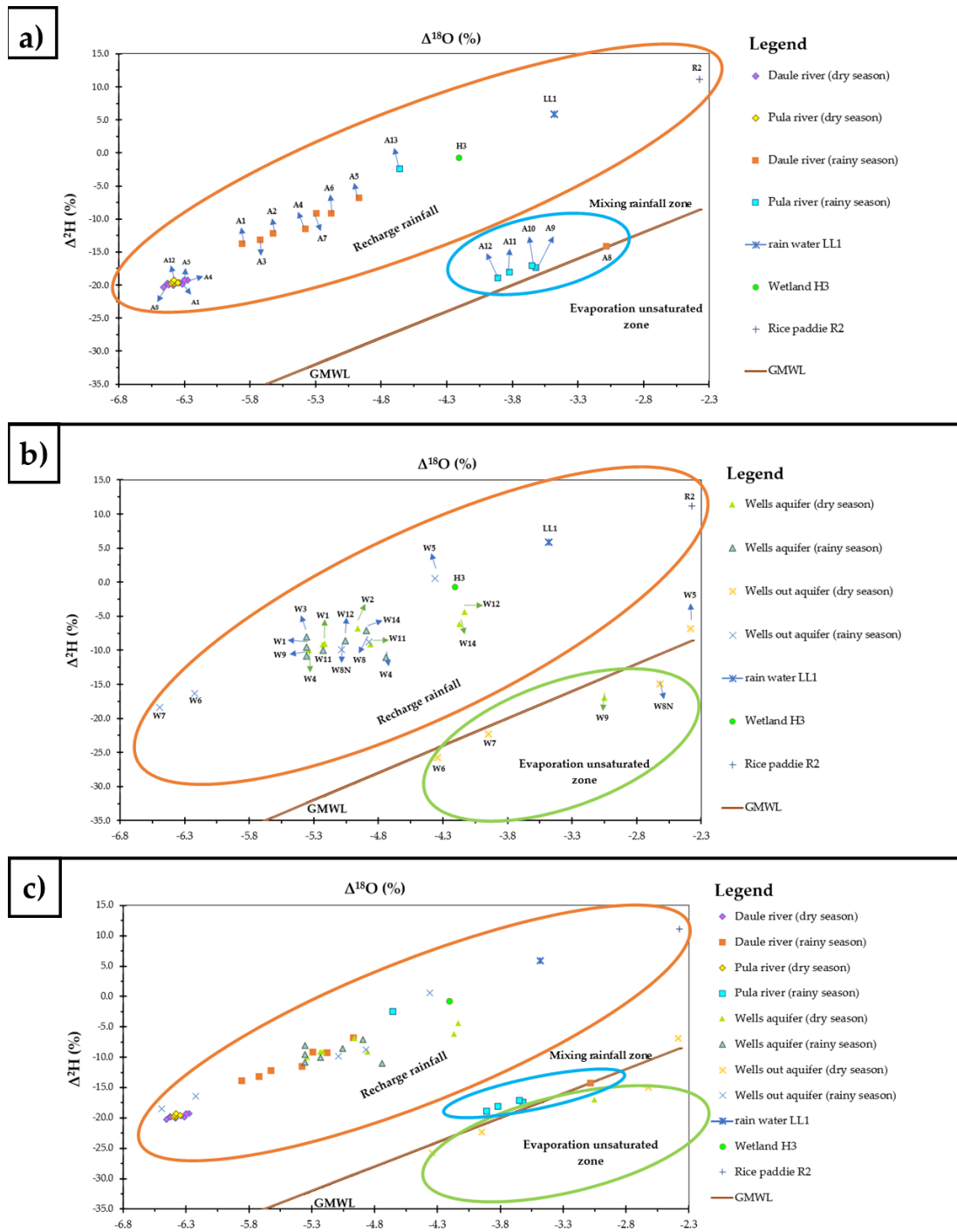


Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 23. Radio Cl/Br

En la Figura 24 se presenta el diagrama de la relación de los isótopos estables del agua ($^2\text{H}/^{18}\text{O}$) en aguas superficiales (río Daule y Pula) y aguas subterráneas (pozos),

pertenecientes a la parte baja de la subcuenca del río Daule. Se incluyó la línea de agua meteórica global (GMWL), que describe la relación promedio anual global entre las proporciones de isótopos de hidrógeno y oxígeno en aguas meteóricas naturales.



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 24. Diagrama de la relación $^2\text{H}/^{18}\text{O}$ en las aguas superficiales y subterráneas de la subcuenca del río Daule. Nota: Global Meteoric Water Line (GMWL).

En la Figura 24a se presentaron los datos de los isótopos estables del agua superficial. Como resultado, se observa que el agua de los ríos se está infiltrando, esta

agua va evolucionando desde las muestras de agua del arrozal, seguidamente el agua de lluvia y el humedal.

Posteriormente, el contenido de deuterium se va concentrando conforme esta agua de lluvia viaja a lo largo del río por el proceso de evaporación, alcanzando valores de hasta $-20\text{‰}^2\text{H}$ (más liviano) en el agua de los ríos Daule y Pula. Adicionalmente, se determinó que el agua del río Pula que se encuentra fuera del área del acuífero tiene el mismo origen o huella química que el agua del río Daule durante el muestreo de la época lluviosa. Por lo tanto, esto indica que es agua del mismo acuífero que se extiende a esta zona NE del acuífero. También se observa que la distribución espacial de las muestras nos indica el proceso de evolución de las aguas. Por ejemplo, las muestras A9, A10, A11 y A12, que fueron tomadas en el río Pula (aguas abajo) están más pesadas en contenido de deuterium y menor peso en ^{18}O , indicando menor evolución respecto a las muestras A13 tomadas más aguas arriba del río Pula y una mezcla de aguas (círculo celeste), que lo confirma la muestra A8 donde se unen los dos ríos.

En la Figura 24b se observa que la evaporación en la zona no saturada es mayor en los pozos externos al acuífero (círculo verde) durante la época seca. Esto se debe a la profundidad de la zona no saturada en los pozos ubicados dentro del acuífero respecto a los pozos que se ubican fuera del acuífero del río Daule, cuya información del espesor de la zona no saturada (zona vadosa) se obtuvo de la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales ejecutados en el sector. Se observó que el espesor de la zona no vadosa en el sector fuera del acuífero (2m) que corresponde al SEV #5 es mayor al espesor saturado que se observa en el interior del acuífero (1m), que corresponde al SEV #6. En este sentido, se confirma que la evaporación va disminuyendo conforme se alcanza mayor profundidad la zona no saturada.

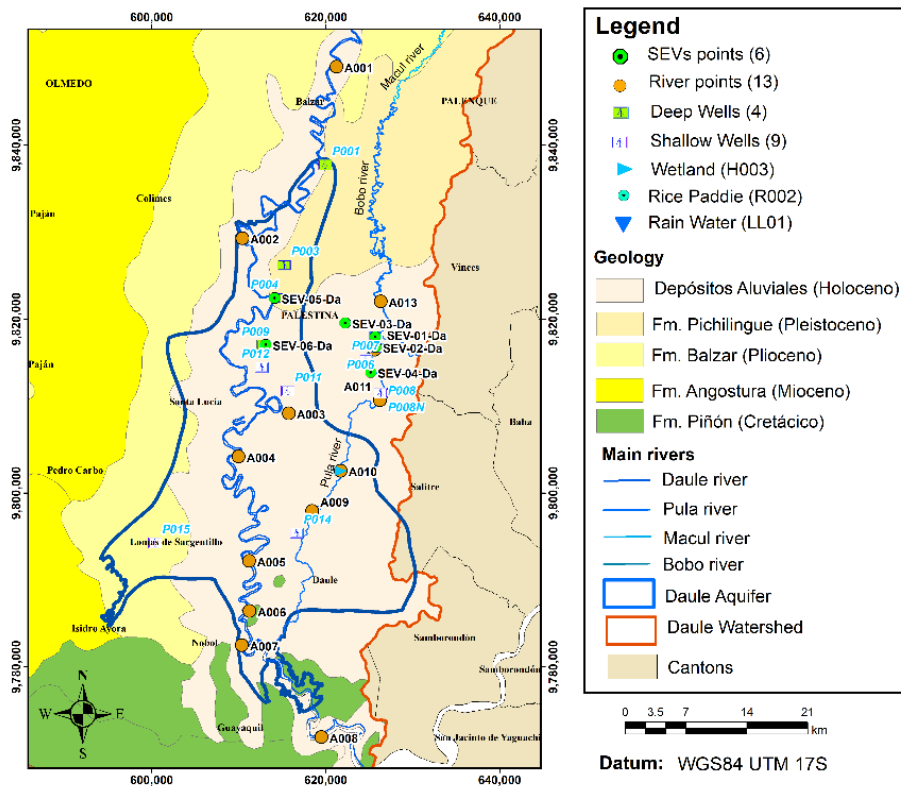
En la Figura 24c se observan todos los puntos de muestreo, tanto para agua superficial como en agua subterránea en las dos épocas estacionales. Como resultado, se observa que se tienen aguas evolucionadas a partir de eventos de precipitación que tienen la misma huella (círculo naranja).

10.6 Modelo conceptual de interacción río-acuífero

Se realizaron diez Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs), distribuidos 6 en la época lluviosa (Febrero 2022) y 4 en época seca (agosto 2022). Los SEVs son un método geofísico indirecto que permite medir la resistencia de las rocas en el subsuelo y

posteriormente calcular su resistividad aparente. La distribución espacial de estos SEVs se observa en la Fuente: Adaptado de (CIPAT-ESPOL; SENAGUA; & AECID, 2014)

Figura 25.



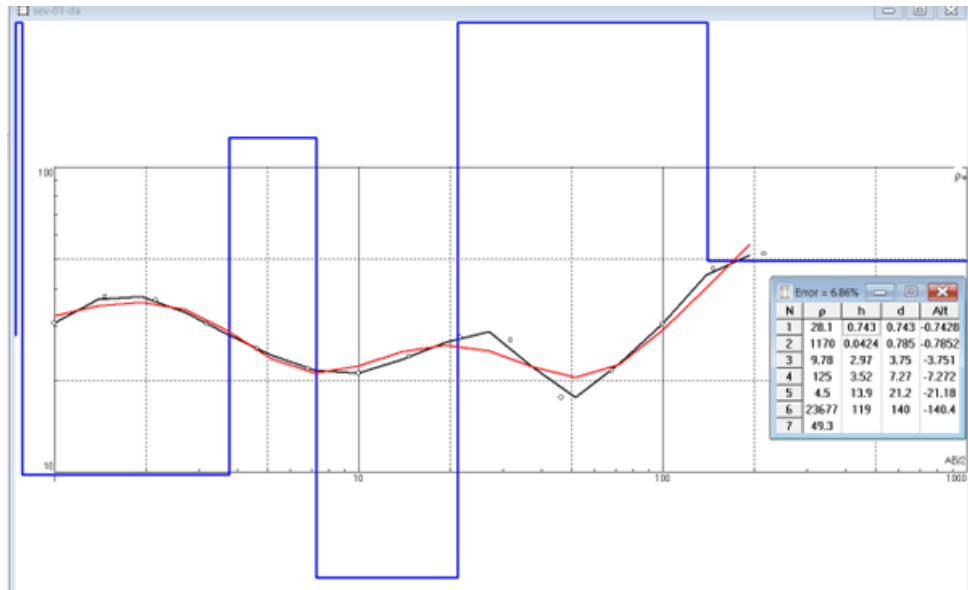
Fuente: Adaptado de (CIPAT-ESPOL; SENAGUA; & AECID, 2014)

Figura 25. Distribución espacial de los SEVs en la zona de estudio

La interpretación de los SEVs de la litología del subsuelo del acuífero se realizó a partir de valores de la resistividad aparente obtenidos del software IPI2WIN (IRIS Instruments, 2022). Los resultados del SEV #1 con abertura AB/2 de 215m y el SEV #6 con abertura AB/2 de 147m, como se muestran en la Fuente: Elaboración propia del autor.

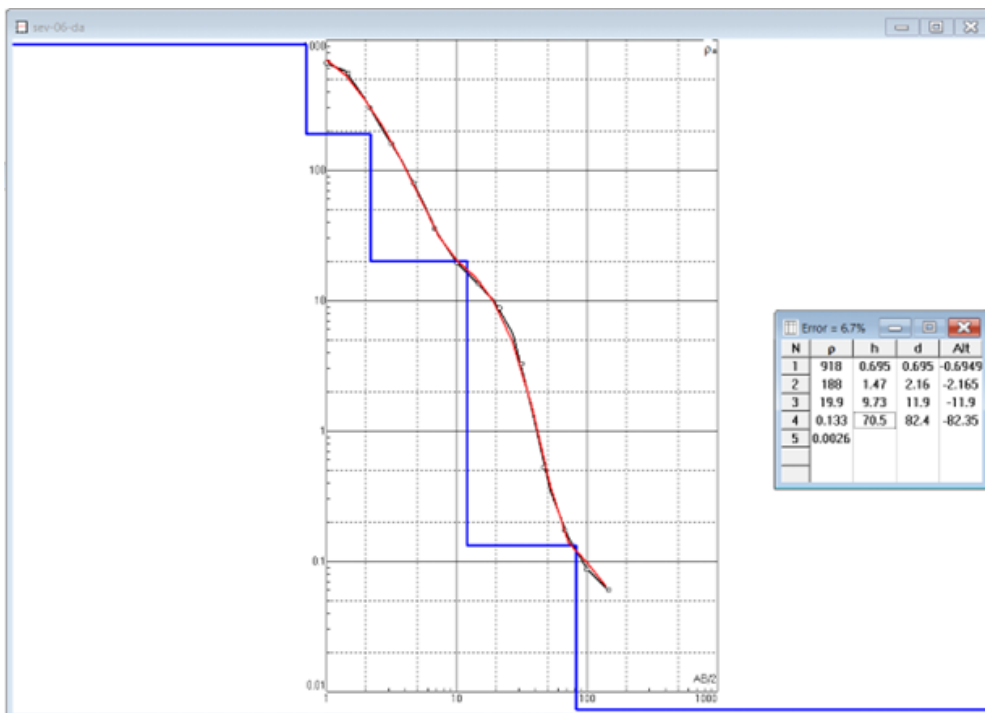
Figura 26 y Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 27 respectivamente.



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 26. Interpretación de SEV #1 en época lluviosa



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 27. Interpretación de SEV #6 en época lluviosa

La interpretación de los sondeos que se incluye en la Tabla 2 y

Tabla 3 indican el número de capas en el subsuelo, caracterización de su respectiva litología, espesor y profundidad. Adicionalmente, los valores de la resistividad aparente de los materiales permiten reconocer las zonas con posible presencia de agua subterránea con su respectiva profundidad, lo que permite correlacionar con la información de los niveles de agua de los pozos cercanos. Como resultado se observa que el agua subterránea se encuentra aproximadamente desde los 14m de profundidad.

Tabla 2. Interpretación de SEV #1 en época lluviosa

| N | Descripción | Espesor (m) | Profundidad (m) | Resistividad (Ωm) |
|----------|---|--------------------|------------------------|--|
| 1 | Arenas con arcillas | 2.13 | 2.13 | 27.6 |
| 2 | Material arcilloso | 1.55 | 3.68 | 3.92 |
| 3 | Posibles arenas y arcillas compactas | 3.4 | 7.08 | 90.4 |
| 4 | Material arcilloso con posible saturación de agua salobre | 14.2 | 21.3 | 3.84 |
| 5 | Material compacto | 122 | 143 | 248 |
| 6 | Material arcilloso con posible presencia de agua salobre. | | | 3.98 |

Tabla 3. Interpretación de SEV # 6 en época lluviosa

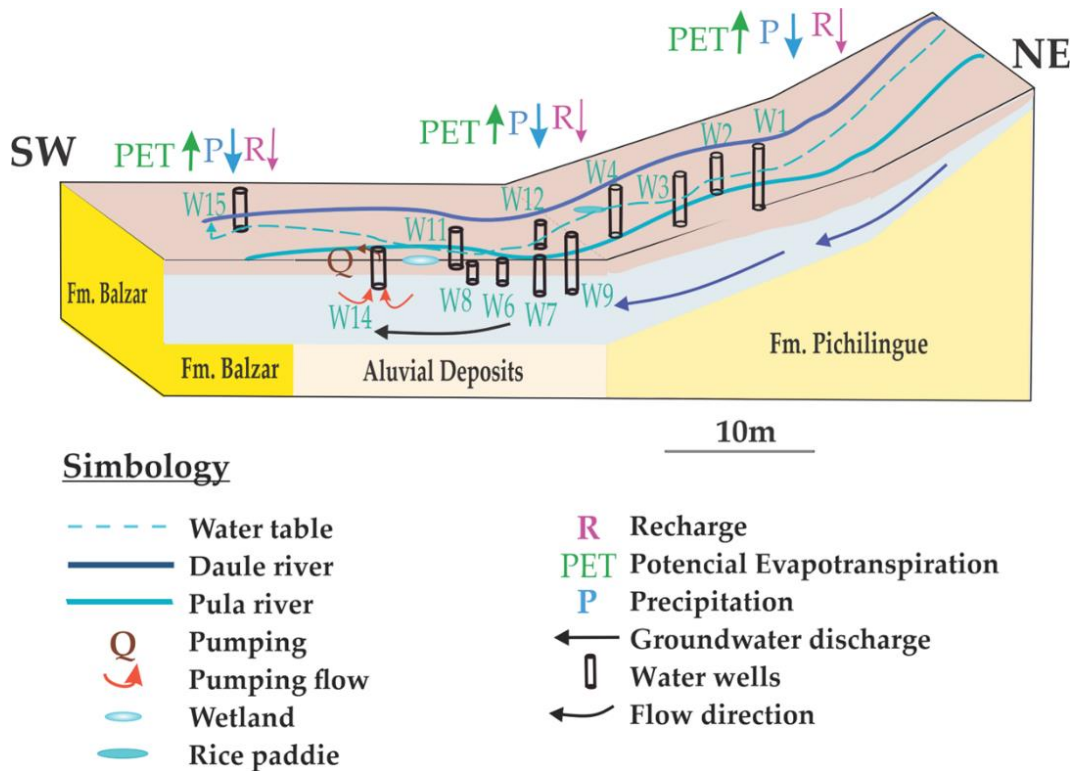
| N | Descripción | Espesor (m) | Profundidad (m) | Resistividad (Ωm) |
|----------|---|--------------------|------------------------|--|
| 1 | Rocas compactas | 0.695 | 0.695 | 918.0 |
| 2 | Rocas compactas fracturadas | 1.47 | 2.16 | 188.0 |
| 3 | Arenas y gravas (posible presencia de agua subterránea) | 9.73 | 11.9 | 19.9 |
| 4 | Material arcilloso con posible saturación de agua salobre | 70.5 | 14.2 | 0.133 |
| 5 | Material arcilloso con posible presencia de agua salobre. | | 82.4 | 0.0026 |

En la Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 28 se incluyó el modelo conceptual que representa la interacción del sistema río-acuífero Daule, donde se incluye la distribución de los pozos, ríos principales y de manera esquemática el tamaño de los pozos indica su profundidad. Como resultado se observa que existe una correlación entre las profundidades estimadas donde es posible encontrar agua subterránea con la interpretación de los SEVs y la profundidad de los pozos. Es así como el SEV #1 está cercano al Pozo #7, donde la profundidad del pozo es 21m y la profundidad estimada de agua con el sondeo es de 21.3m. Así también, con el SEV #6 que está próximo al Pozo # 12, el cual tiene una profundidad de 12 y la profundidad estimada de agua con el sondeo es de 14.2m.

Este modelo conceptual permite representar espacialmente la distribución de los pozos en el acuífero Daule, el aporte de los ríos principales (Daule y Pula). Así también, la presencia del humedal en las proximidades del pozo 11 contribuye a la recarga y a la mejora de la calidad del agua subterránea de este pozo.

Se aplicó el Principal Component Analysis para datos de precipitaciones mensuales históricas en el sector para comprender proceso de recarga. Las abundantes precipitaciones en la época lluviosa (enero-abril) demostraron que el acuífero recarga al río y a su vez las planicies de inundación (e.g. humedales) ayudan a conservar el agua superficial por más tiempo.



Fuente: Elaboración propia del autor.

Figura 28. Modelo conceptual de la interacción río-acuífero

11 CONCLUSIONES

Este trabajo permitió generar un modelo conceptual que representa la interacción río-acuífero en la parte baja de la subcuenca del río Daule, incluyendo la distribución espacial y topográfica de los sitios de muestreo en agua superficial (ríos) y agua subterránea (pozos). También se analizó la información resultante de iones representativos (diagrama de Piper), logrando identificar la química del agua del sector, que es predominantemente de tipo aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas.

Se determinó que la química del agua superficial y subterránea, tanto en las muestras ubicadas en el interior del acuífero como las muestras tomadas en el río Pula y los pozos externos al acuífero presentaron una misma tipología de agua (aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas), con evidencia de presencia de rocas cristalinas en las muestras de agua superficial durante la época seca por los cristales de cuarzo en las arenas que afloran en el sector. Adicionalmente, se comprobó que el agua subterránea proveniente del río Pula, ubicado fuera de la delimitación actual del acuífero del río Daule representan la misma agua, que se correlaciona con la geología y geofísica de la zona.

En el sistema río-acuífero Daule, el diagrama de Piper distinguió un grupo de agua representativo que dependen de la recarga por precipitación en la zona. Por otro lado, el diagrama de la relación Cl/Br en ambas campañas (época seca y lluviosa), corresponde a aguas de recarga producto de lluvias en áreas costeras urbanas con evidencia de evaporitas marinas. Estos resultados se confirman con los SEVs realizados en el sector, encontrando materiales con posible presencia de agua salobre desde los 20m de profundidad. Finalmente, el monitoreo en agua superficial-subterránea demostró que los niveles de salinidad superan los 0.5 PSU que indica la presencia de agua salobre, principalmente en el agua de pozos durante época seca. Con lo cual se evidencia la importancia de las precipitaciones en la recarga del acuífero. Existe un patrón de comportamiento de los datos asociado a su distribución espacial. Los puntos de muestreo de los ríos se asocian por época climática. Un aspecto similar ocurre con los puntos de muestro en pozos.

Se observó que el agua del acuífero del río Daule y su aporte del río Pula son predominantemente agua de recarga, sin evidencia de contaminación por actividad antropogénica ni intrusión salina.

El análisis de componentes principales (PCA) con datos de precipitaciones en el periodo 2000-2021 permitió reconocer un comportamiento bimodal de la subcuenca, verificando la predominancia de dos épocas estacionales, época lluviosa (enero-abril) y época seca (mayo-diciembre). Adicionalmente, con la aplicación de PCA con los parámetros de campo-laboratorio se identificaron los principales vínculos: relación directamente proporcional entre la conductividad eléctrica, TDS y salinidad, las cuales tienen una relación inversa con el pH, DQO, turbidez y nitritos (Figura 18b). Finalmente, se aplicó la técnica multivariante de K-means clustering (Figura 19 y 20), identificando cinco clusters representativos que se ajustan con la distribución espacial y temporal (épocas estacionales) de los puntos de muestreo en superficial y subterránea. Esta información permite conocer el comportamiento hidrológico del sistema río-acuífero bajo los parámetros monitoreados.

La información recopilada en las dos épocas estacionales en la caracterización hidroquímica e isotópica del sistema río-acuífero, monitoreo de la calidad del agua, campañas geoeléctricas (SEVs) y la medida de niveles de pozos permitieron establecer los lineamientos para la elaboración de un modelo conceptual que represente las características de interacción río-acuífero. Se esquematizó la dirección del flujo, los parámetros que aportaron al balance hidrológico del sector como el

predominio de la evapotranspiración en los últimos años. Así también, la información de la profundidad estimada de agua subterránea estimada con la interpretación de los SEVs se verificó con la profundidad de los pozos.

12 RECOMENDACIONES

- Es importante implementar el monitoreo de la calidad del agua en planicies de inundación (e.g. humedales) para conocer el estado de estos ecosistemas acuáticos, considerando la evaluación del impacto de sistemas híbridos humedal-arrozal en la degradación de la calidad del agua y propagación de plagas.
- Realizar un estudio de revisión de literatura para analizar la implementación de azolla en el control de problemas de eutrofización en los ecosistémicos acuáticos del sector.
- Controlar de los servicios ecosistémicos presentes en el sistema río-acuífero (de aprovisionamiento, de regulación y cultural) y manejo de especies invasivas (e.g. lechuguines) que ha incrementado por efectos de la erosión.
- Una eficiente gestión de los recursos hídricos a nivel de cuenca hidrográfica requiere de sólidos conocimientos acerca de la interacción río-acuífero en la zona de estudio. Estos conocimientos aportarían en la toma de decisiones de las autoridades locales.
- Es indispensable el monitoreo continuo de los iones Cl y Br en las dos épocas estacionales para el planteamiento de directrices de prevención y conservación de la calidad del agua del acuífero y los principales ríos aportantes (río Daule y río Pula).
- Para un correcto manejo de los recursos hídricos es indispensable considerar el aporte de la gestión comunitaria-participativa donde existe la interacción comunidad-academia, enfocada en el desarrollo sostenible de un sector determinado, aplicado con éxito en algunos sectores de la provincia de Santa Elena (Paúl Carrión-Mero, Morante-Carballo, et al., 2021; Herrera-Franco et al., 2020; Herrera-Franco, Alvarado-Macancela, et al., 2018; Herrera-Franco, Carrión Mero, et al., 2018). Complementariamente, el desarrollo de modelos de la geometría del acuífero y del flujo y transporte permiten conocer el comportamiento de los sistemas hidrológicos subterráneos (Paul Carrión-Mero et al., 2021; Paúl Carrión-Mero, Montalván, Morante-Carballo, Loor-Flores de Valgas, et al., 2021).

- La gestión integrada de los recursos hídricos representa una herramienta de participación de entes multidisciplinarios. En este sentido, es imprescindible la socialización de los proyectos de AVSF con la comunidad para compartir hallazgos alcanzados y emitir recomendaciones a las autoridades tomadores de decisiones de la gestión del agua en el sector. Adicionalmente, las actividades antrópicas han aportado en el cambio de uso de suelo evidenciado en el acuífero del río Daule, lo que a su vez aporta en las tasas de erosión en el sector. Esto se evidencia también en el incremento de la evapotranspiración de los últimos años.
- Es importante implementar el monitoreo de la calidad del agua en planicies de inundación (e.g. humedales) para conocer el estado de estos ecosistemas acuáticos, considerando la evaluación del impacto de sistemas híbridos humedal-arrozal en la degradación de la calidad del agua y propagación de plagas.
- La limitación de este estudio es que al ser un análisis pionero, sin análisis previos de hidroquímica, isotopía, geofísica en la zona de estudio, representa un reto en la interpretación de análisis del agua. Sin embargo, la implementación de estudios complementarios en la subcuenca media y alta del río Daule garantizarían el manejo integral del ecosistema Guayas.
- Con este trabajo se generan líneas de investigación que podrían aplicarse en futuros estudios: i) análisis de trazadores radioactivos; ii) caracterización geoquímica, iii) levantamiento geológico del sector, iv) aplicación de índices de calidad de agua, v) valoración de servicios ecosistémicos, vi) uso de teledetección para el mapeo de zonas inundables.

13 REFERENCIAS

- Abed, M. F., Zarraq, G., & Ahmed, S. H. (2021). Hydrogeochemical Assessment of Groundwater Quality and its Suitability for Irrigation and Domestic Purposes in Rural Areas, North of Baiji City-Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 2296–2306. <https://doi.org/10.24996/ijs.2021.62.7.18>
- Adams, S., Titus, R., Pietersen, K., Tredoux, G., & Harris, C. (2001). Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa. *Journal of Hydrology*, 241(1–2), 91–103. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00370-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00370-X)
- Agbasi, O. ., & Etuk, S. E. (2016). Hydro-Geoelectric Study of Aquifer Potential in Parts of Ikot Abasi Local Government Area, Akwa Ibom State, Using Electrical Resistivity Soundings. *International Journal of Geology and Earth Sciences*, 2(4), 43–54.
- Alvarez-Mieles, G., Irvine, K., Griensven, A. V., Arias-Hidalgo, M., Torres, A., & Mynett, A. E. (2013). Relationships between aquatic biotic communities and water quality in a tropical river–wetland system (Ecuador). *Environmental Science & Policy*, 34, 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.01.011>
- Ávila-Baray, H. L. (2006). *Introducción a la metodología de la investigación* (Edición EI). www.eumed.net/libros/2006c/203/
- Barbieri, M., Boschetti, T., Petitta, M., & Tallini, M. (2005). Stable isotope (^2H , ^{18}O and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). *Applied Geochemistry*, 20(11), 2063–2081. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.07.008>
- Borbor-Cordova, M. J., Boyer, E. W., McDowell, W. H., & Hall, C. A. (2006). Nitrogen and phosphorus budgets for a tropical watershed impacted by agricultural land use: Guayas, Ecuador. *Biogeochemistry*, 79(1–2), 135–161. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9009-7>
- Bravo-Velásquez, K. (2017). *Determinación de Cadmio En Eichhornia Crassipes y otras plantas acuáticas en los ríos Guayas, Daule y Babahoyo: Propuesta de Monitoreo Ambiental*. Universidad de Guayaquil.
- Burgos-Torres, C. (2017). *DISEÑO DE MODELO ESTRATIGRÁFICO DE LAS FORMACIONES CUATERNARIAS DEL SECTOR SEPTENTRIONAL DE LA CUENCA BAJA DEL GUAYAS*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- Cai, Z., Wang, W., Zhao, M., Ma, Z., Lu, C., & Li, Y. (2020). Interaction between Surface Water and Groundwater in Yinchuan Plain. *Water*, 12(9), 2635. <https://doi.org/10.3390/w12092635>
- Carrard, N., Foster, T., & Willetts, J. (2019). Groundwater as a Source of Drinking Water in Southeast Asia and the Pacific: A Multi-Country Review of Current Reliance and Resource Concerns. *Water*, 11(8), 1605. <https://doi.org/10.3390/w11081605>
- Carrión-Mero, Paúl, Cruz, M., & Herrera-Franco, G. (2019). Las aguas subterráneas en la legislación iberoamericana: retos y oportunidades. In Juan María Fornés Azcoiti (Ed.), *LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA LEGISLACIÓN IBEROAMERICANA: RETOS Y OPORTUNIDADES* (IGME, pp. 79–94). IGME.
- Carrión-Mero, Paúl, Montalván-Burbano, N., Morante-Carballo, F., Quesada-Román, A., & Apolo-Masache, B. (2021). Worldwide Research Trends in Landslide Science. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9445. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189445>

- Carrión-Mero, Paúl, Montalván, F. J., Morante-Carballo, F., Heredia, J., Elorza, F. J., Solórzano, J., & Aguilera, H. (2021). Hydrochemical and Isotopic Characterization of the Waters of the Manglaralto River Basin (Ecuador) to Contribute to the Management of the Coastal Aquifer. *Water*, 13(4), 537. <https://doi.org/10.3390/w13040537>
- Carrión-Mero, Paúl, Montalván, F. J., Morante-Carballo, F., Loor-Flores de Valgas, C., Apolo-Masache, B., & Heredia, J. (2021). Flow and transport numerical model of a coastal aquifer based on the hydraulic importance of a dyke and its impact on water quality. Manglaralto—Ecuador. *Water*, 13(4), 443. <https://doi.org/10.3390/w13040443>
- Carrión-Mero, Paúl, Morante-Carballo, F., Vargas-Ormaza, V., Apolo-Masache, B., & Jaya-Montalvo, M. (2021). A Conceptual Socio-Hydrogeological Model Applied to Sustainable Water Management. Case Study of the Valdivia River Basin, Southwestern Ecuador. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 16(7), 1275–1285. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.160708>
- Carrión-Mero, Paul, Quiñonez-Barzola, X., Morante-Carballo, F., Montalván, F. J., Herrera-Franco, G., & Plaza-Úbeda, J. (2021). Geometric Model of a Coastal Aquifer to Promote the Sustainable Use of Water. Manglaralto, Ecuador. *Water*, 13(7), 923. <https://doi.org/10.3390/w13070923>
- CELEC. (2014). *Memoria Técnica Descriptiva: Levantamiento Batimétrico en Áreas del Embalse Daule-Peripa*.
- Chagué-Goff, C., Mark, A. F., & Dickinson, K. J. M. (2010). Hydrological processes and chemical characteristics of low-alpine patterned wetlands, south-central New Zealand. *Journal of Hydrology*, 385(1–4), 105–119. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.007>
- Chen, L., Yin, X., Xie, W., & Feng, X. (2014). Calculating groundwater mixing ratios in groundwater-inrushing aquifers based on environmental stable isotopes (D, 18O) and hydrogeochemistry. *Natural Hazards*, 71(1), 937–953. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0941-2>
- CIPAT-ESPOL; SENAGUA;, & AECID, D. (2014). *Proceso: Re-Senagua-026-2012. Proyecto: Elaboración del mapa hidrogeológico a escala 1:250.000. Informe final*. file:///C:/Users/GAMER MSI/Downloads/PROCESO_RE-SENAGUA_PROYECTO_ELABORACIÓN DEL MAPA HIDROGEOLÓGICO A ESCALA 1_ INFORME FINAL.pdf
- Custodio, E. (2002). Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10(2), 254–277. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0188-6>
- D. D. C. Mbonu, J. O. Ebeniro, C. O. O., & Ekine, A. S. (1991). Geoelectrical Sounding for Determination of Aquifer Characteristics in Parts of Umuahia Area of Nigeria. *Geophysics*, 56(5), 284–291.
- Damanik-Ambarita, M. N., Lock, K., Boets, P., Everaert, G., Nguyen, T. H. T., Forio, M. A. E., Musonge, P. L. S., Suhareva, N., Bennetsen, E., Landuyt, D., Dominguez-Granda, L., & Goethals, P. L. M. (2016). Ecological water quality analysis of the Guayas river basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices. *Limnologica*, 57, 27–59. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.01.001>
- Deknock, A., De Troyer, N., Houbraken, M., Dominguez-Granda, L., Nolivos, I., Van Echelpoel, W., Forio, M. A. E., Spanoghe, P., & Goethals, P. (2019). Distribution of agricultural pesticides in the freshwater environment of the Guayas river basin (Ecuador). *Science of The Total Environment*, 646, 996–1008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.185>
- Dillon, P. (2005). Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 13(1),

313–316. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0413-6>

- Diop, S., & Rekecewicz, P., Diop, S., & Rekecewicz, P. (2003). *Atlas mondial de l'eau. Une pénurie annoncée* (Autrement). <http://hdl.handle.net/20.500.11822/22717>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *133*, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Doppler, T., Franssen, H.-J. H., Kaiser, H.-P., Kuhlman, U., & Stauffer, F. (2007). Field evidence of a dynamic leakage coefficient for modelling river–aquifer interactions. *Journal of Hydrology*, *347*(1–2), 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.017>
- Du, P., Jia, H., & Yu, S. L. (2012). Urban watershed management under rapid urbanization. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, *6*(5), 595–595. <https://doi.org/10.1007/s11783-012-0452-5>
- Duque, C., Jessen, S., Tirado-Conde, J., Karan, S., Engesgaard, P., Duque, Jessen, Tirado-Conde, Karan, Engesgaard, Duque, C., Jessen, S., Tirado-Conde, J., Karan, S., Engesgaard, P., Duque, Jessen, Tirado-Conde, Karan, & Engesgaard. (2019). Application of Stable Isotopes of Water to Study Coupled Submarine Groundwater Discharge and Nutrient Delivery. *Water*, *11*(9), 1842. <https://doi.org/10.3390/w11091842>
- EVEREST Geophysics. (2022). *EVEREST Geophysics. ELECTRIC METHODS VERTICAL ELECTRICAL SOUNDINGS*. <https://everestgeophysics.com/methods/electric/vertical-electrical-soundings/>
- Fackrell, J. K., Glenn, C. R., Thomas, D., Whittier, R., & Popp, B. N. (2020). Stable isotopes of precipitation and groundwater provide new insight into groundwater recharge and flow in a structurally complex hydrogeologic system: West Hawai'i, USA
[美国夏威夷西部降水和地下水稳定同位素为结构复杂的水文地质系统地下水补给和运动提供了新的见解] [Nouvelles informations fournies à pa. *Hydrogeology Journal*, *28*(4), 1191–1207. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02143-9>
- FAO. (2021). *Earth Map 1.2.0*. Temperature Maximum, ECMWF ERA 5 and Monthly NDVI. <https://earthmap.org/>
- Forina, M., Armanino, C., & Raggio, V. (2002). Clustering with dendrograms on interpretation variables. *Analytica Chimica Acta*, *454*(1), 13–19. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(01\)01517-3](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)01517-3)
- Frei, S., Fleckenstein, J. H., Kollet, S. J., & Maxwell, R. M. (2009). Patterns and dynamics of river–aquifer exchange with variably-saturated flow using a fully-coupled model. *Journal of Hydrology*, *375*(3–4), 383–393. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.038>
- Galbán-Rodríguez, E., Torres-Ponjuán, D., Martí-Lahera, Y., & Arencibia-Jorge, R. (2019). Measuring the Cuban scientific output in scholarly journals through a comprehensive coverage approach. *Scientometrics*, *121*(2), 1019–1043. <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03233-6>
- Guo, Q., Yang, Y., Han, Y., Li, J., & Wang, X. (2019). Assessment of surface–groundwater interactions using hydrochemical and isotopic techniques in a coalmine watershed, NW China. *Environmental Earth Sciences*, *78*(3). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8053-2>
- Guzmán, P., Anibas, C., Batelaan, O., Huysmans, M., & Wyseure, G. (2016). Hydrological

- connectivity of alluvial Andean valleys: a groundwater/surface-water interaction case study in Ecuador. *Hydrogeology Journal*, 24(4), 955–969. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1361-z>
- Harou, J. J., & Lund, J. R. (2008). Ending groundwater overdraft in hydrologic-economic systems. *Hydrogeology Journal*, 16(6), 1039. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0300-7>
- Harry, T. A., Ushie, F. A., & Agbasi, O. E. (2018). Hydraulic and Geoelectric relationships of Aquifers Using Vertical Electrical Sounding (VES) in parts of Obudu, Southern Nigeria. *World Scientific News*, 94(2), 261–275.
- Helena, B.A., Vega, M., Barrado, E. (1999). Case of Hydrochemical Characterization of an Alluvial Aquifer Influenced by Human Activities. *Water, Air, & Soil Pollution*, 12, 365–387. <https://doi.org/10.1023/A:1005065422156>
- Herrera-Franco, G., Alvarado-Macancela, N., Gavín-Quinchuela, T., & Carrión-Mero, P. (2018). Participatory socio-ecological system: Manglaralto-Santa Elena, Ecuador. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(4), 303–310. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1481632>
- Herrera-Franco, G., Bravo-Montero, Lady, Carrión-Mero, P., Morante-Carballo, F., & Apolo-Masache, B. (2020). Community management of the Olón coastal aquifer, Ecuador, and its impact on the supply of water suitable for human consumption. *Sustainable Development and Planning XI*, 169–181. <https://doi.org/10.2495/SDP200141>
- Herrera-Franco, G., Carrión Mero, P., & Alvarado-Macancela, N. (2018). Participatory Process for Local Development: Sustainability of Water Resources in Rural Communities: Case Manglaralto-Santa Elena, Ecuador. In *Handbook of Sustainability Science and Research* (pp. 663–676). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63007-6_41
- Herrera-Franco, G., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., & Bravo-Montero, Lady. (2021). Worldwide Research on Socio-Hydrology: A Bibliometric Analysis. *Water*, 13(9), 1283. <https://doi.org/10.3390/w13091283>
- Hidalgo-Bastidas, J. P., Boelens, R., & Isch, E. (2018). Hydroterritorial Configuration and Confrontation: The Daule-Peripa Multipurpose Hydraulic Scheme in Coastal Ecuador. *Latin American Research Review*, 53(3), 517. <https://doi.org/10.25222/larr.362>
- Hokanson, K. J., Mendoza, C. A., & Devito, K. J. (2019). Interactions Between Regional Climate, Surficial Geology, and Topography: Characterizing Shallow Groundwater Systems in Subhumid, Low-Relief Landscapes. *Water Resources Research*, 55(1), 284–297. <https://doi.org/10.1029/2018WR023934>
- Huang, X., Wang, G., Liang, X., Cui, L., Ma, L., & Xu, Q. (2018). Hydrochemical and Stable Isotope (δD and $\delta 18O$) Characteristics of Groundwater and Hydrogeochemical Processes in the Ningtiaota Coalfield, Northwest China. *Mine Water and the Environment*, 37(1), 119–136. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0477-x>
- Huayamave, J. (2013). *Estudio de las aguas y sedimentos del río Daule, en la provincia del Guayas, desde el punto de vista físico-químico, orgánico bacteriológico y toxicológico*. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.
- Hwang, J. Y., Park, S., Kim, M.-S., Jo, H.-J., Lee, G., Jeon, S. H., Song, D. H., Kim, D.-H., Kim, T.-S., Chung, H. M., & Kim, H.-K. (2017). Applications of Hydrochemical Models for Groundwater in Korea. *Environment and Natural Resources Research*, 7(3), 51. <https://doi.org/10.5539/enrr.v7n3p51>

- Iacurto, S., Grelle, G., De Filippi, F. M., & Sappa, G. (2021). Karst Recharge Areas Identified by Combined Application of Isotopes and Hydrogeological Budget. *Water*, 13(14), 1965. <https://doi.org/10.3390/w13141965>
- INAHMI. (2020). *Anuarios Meteorológicos del INAHMI año 2012*. Anuarios Meteorológicos Por Año: INAHMI. <https://elyex.com/inamhi-anuarios-metereologicos-en-pdf/>
- IRIS Instruments. (2022). *Download — x2ipi - data processing for 2D resistivity imaging* (Download — x2ipi-data processing for 2D resistivity imaging). IPI2win Software. <http://x2ipi.ru/downloads>
- Ivosev, G., Burton, L., & Bonner, R. (2008). Dimensionality Reduction and Visualization in Principal Component Analysis. *Analytical Chemistry*, 80(13), 4933–4944. <https://doi.org/10.1021/ac800110w>
- J. Horne, A., & Remington Goldman, C. (1994). *Limnology* (2nd Editio). McGraw-Hill. <https://www.worldcat.org/es/title/limnology/oclc/647368081>
- Jiang, W., Wang, G., Sheng, Y., Shi, Z., & Zhang, H. (2019). Isotopes in groundwater (2H, 18O, 14C) revealed the climate and groundwater recharge in the Northern China. *Science of The Total Environment*, 666, 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.245>
- Jiang, Y., Ritchie, B. W., & Benckendorff, P. (2019). Bibliometric visualisation: an application in tourism crisis and disaster management research. *Current Issues in Tourism*, 22(16), 1925–1957. <https://doi.org/10.1080/13683500.2017.1408574>
- Karlović, I., Marković, T., & Vujnović, T. (2021). Groundwater Recharge Assessment Using Multi Component Analysis: Case Study at the NW Edge of the Varaždin Alluvial Aquifer, Croatia. *Water*, 14(1), 42. <https://doi.org/10.3390/w14010042>
- Kazakis, N., Vargemezis, G., & Voudouris, K. S. (2016). Estimation of hydraulic parameters in a complex porous aquifer system using geoelectrical methods. *Science of The Total Environment*, 550, 742–750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.133>
- Kelly, W. E. (1977). Geoelectric Sounding for Estimating Aquifer Hydraulic Conductivity. *Ground Water*, 15(6), 420–425. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1977.tb03189.x>
- Kim, Y., Lee, K.-S., Koh, D.-C., Lee, D.-H., Lee, S.-G., Park, W.-B., Koh, G.-W., & Woo, N.-C. (2003). Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer: a case study in Jeju volcanic island, Korea. *Journal of Hydrology*, 270(3–4), 282–294. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00307-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00307-4)
- Kumar, D., Ahmed, S., Krishnamurthy, N. S., & Dewandel, B. (2007). Reducing ambiguities in vertical electrical sounding interpretations: A geostatistical application. *Journal of Applied Geophysics*, 62(1), 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.07.001>
- Leitão, J., Pereira, D., & Gonçalves, Â. (2022). Business Incubators, Accelerators, and Performance of Technology-Based Ventures: A Systematic Literature Review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(1), 46. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010046>
- Li, P., Wu, J., Qian, H., Zhang, Y., Yang, N., Jing, L., & Yu, P. (2016). Hydrogeochemical Characterization of Groundwater in and Around a Wastewater Irrigated Forest in the Southeastern Edge of the Tengger Desert, Northwest China. *Exposure and Health*, 8(3), 331–348. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0193-y>
- Liu, Y., & Yamanaka, T. (2012). Tracing groundwater recharge sources in a mountain-plain transitional area using stable isotopes and hydrochemistry. *Journal of Hydrology*, 464–465, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.053>

- Lloyd, C. E. M., Freer, J. E., Johnes, P. J., & Collins, A. L. (2016). Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments. *Science of The Total Environment*, 543, 388–404. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.028>
- Loucks, D. P., & Jia, H. (2012). Managing water for life. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 6(2), 255–264. <https://doi.org/10.1007/s11783-011-0359-6>
- Ma, R., Sun, Z., Hu, Y., Chang, Q., Wang, S., Xing, W., & Ge, M. (2017). Hydrological connectivity from glaciers to rivers in the Qinghai–Tibet Plateau: roles of suprapermafrost and subpermafrost groundwater. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9), 4803–4823. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4803-2017>
- MAE. (2015). *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga De Efluentes: Recurso Agua. Libro VI Anexo 1.*
- Mazáč, O., Kelly, W. E., & Landa, I. (1985). A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers. *Journal of Hydrology*, 79(1–2), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90178-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90178-7)
- Merigó, J. M., & Yang, J.-B. (2017). A bibliometric analysis of operations research and management science. *Omega*, 73, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.12.004>
- Ministerio del Ambiente, & Consejo Nacional de Recursos Hídricos. (2002). *División Hidrográfica del Ecuador.* http://intranet.comunidadandina.org/Documentos/Reuniones/DTrabajo/SG_REG_EM_AB_IX_dt 3_Ax2.pdf
- Montaño-Armijos, M. de J. (2010). *Ecosistema Guayas (Ecuador): Recursos, Medio Ambiente y Sostenibilidad en la perspectiva de Conocimiento Tropical* [Universidad Miguel Hernández de Elche]. https://www.researchgate.net/profile/Mariano-Montano/publication/220034771_Ecosistema_Guayas_Ecuador_Recursos_Medio_Ambiente_y_Sostenibilidad_en_la_perspectiva_de_Conocimiento_Tropical/links/0922b4f480cc2b4e8d000000/Ecosistema-Guayas-Ecuador-Recursos-Medi
- Mopa, B., Peter, O., & Ayorinde, O. O. (2017). Assessment of Groundwater Quality within Asa and Oyun River Basins South Western Nigeria Using Water Quality Index. *Journal of Hydrogeology & Hydrologic Engineering*, 06(01). <https://doi.org/10.4172/2325-9647.1000151>
- NADIRI, A. A., MOGHADDAM, A. A., TSAI, F. T.-C., & FIJANI, E. (2013). Hydrogeochemical analysis for Tasuj plain aquifer, Iran. *Journal of Earth System Science*, 122(4), 1091–1105. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0329-4>
- Negrel, P., Pauwels, H., Dewandel, B., Gandolfi, J. M., Mascré, C., & Ahmed, S. (2011). Understanding groundwater systems and their functioning through the study of stable water isotopes in a hard-rock aquifer (Maheshwaram watershed, India). *Journal of Hydrology*, 397(1–2), 55–70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.033>
- ONU. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe.* Organización de las Naciones Unidas (ONU). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
- Onuoha, K. M., & Mbazi, F. C. C. (1988). Aquifer Transmissivity from Electrical Sounding Data: The case of Ajali Sandstone Aquifers, Southeast of Enugu, Nigeria. In *Groundwater and Mineral Resources of Nigeria* (pp. 17–29). Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-87857-1_3
- Pérez-Martín, M. A., Estrela, T., Andreu, J., & Ferrer, J. (2014). Modeling Water Resources and River-Aquifer Interaction in the Júcar River Basin, Spain. *Water*

- Resources Management*, 28(12), 4337–4358. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0755-3>
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25(6), 914. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Raji, W. O., & Abdulkadir, K. A. (2020). Evaluation of groundwater potential of bedrock aquifers in Geological Sheet 223 Ilorin, Nigeria, using geo-electric sounding. *Applied Water Science*, 10(10), 220. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01303-2>
- Rasul, G. (2016). Managing the food, water, and energy nexus for achieving the Sustainable Development Goals in South Asia. *Environmental Development*, 18, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.12.001>
- Ribeiro, L., Pindo, J. C., & Dominguez-Granda, L. (2017). Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method. *Science of The Total Environment*, 574, 1674–1683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.004>
- Rolia, E., & Sutjningsih, D. (2018). *Application of geoelectric method for groundwater exploration from surface (A literature study)*. 020018. <https://doi.org/10.1063/1.5042874>
- Rose, S. (2007). The effects of urbanization on the hydrochemistry of base flow within the Chattahoochee River Basin (Georgia, USA). *Journal of Hydrology*, 341(1–2), 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.019>
- Rushton, K. (2007). Representation in regional models of saturated river–aquifer interaction for gaining/losing rivers. *Journal of Hydrology*, 334(1–2), 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.008>
- Sanz, D., Castaño, S., Cassiraga, E., Sahuquillo, A., Gómez-Alday, J. J., Peña, S., & Calera, A. (2011). Modeling aquifer–river interactions under the influence of groundwater abstraction in the Mancha Oriental System (SE Spain). *Hydrogeology Journal*, 19(2), 475–487. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0694-x>
- Song, J., Yang, Y., Sun, X., Lin, J., Wu, M., Wu, J., & Wu, J. (2020). Basin-scale multi-objective simulation-optimization modeling for conjunctive use of surface water and groundwater in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2323–2341. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2323-2020>
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 52–67. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>
- Suslow, T. V. (2004). Oxidation-Reduction Potential (ORP) for Water Disinfection Monitoring, Control, and Documentation. In *Division of Agriculture and Natural Resources* (Publication 8149). University of California, Agriculture and Natural Resources. <https://doi.org/10.3733/ucanr.8149>
- Tatry, M.-V., Fournier, D., Jeannequin, B., & Dosba, F. (2014). EU27 and USA leadership in fruit and vegetable research: a bibliometric study from 2000 to 2009. *Scientometrics*, 98(3), 2207–2222. <https://doi.org/10.1007/s11192-013-1160-z>
- Thi Nguyen, T. H., Boets, P., Lock, K., Damanik Ambarita, M. N., Forio, M. A. E., Sasha, P., Dominguez-Granda, L. E., Thi Hoang, T. H., Everaert, G., & Goethals, P. L. M. (2015). Habitat suitability of the invasive water hyacinth and its relation to water quality and macroinvertebrate diversity in a tropical reservoir. *Limnologica*, 52, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2015.03.006>
- Tuinhof, A., & Heederik, J. (2003). *Management of Aquifer Recharge and Subsurface*

Storage (A. Tuinhof & J. Heederik (eds.)). Netherlands National Committee—International Association of Hydrogeology.

- Ujević Bošnjak, M., Capak, K., Jazbec, A., Casiot, C., Sipos, L., Poljak, V., & Dadić, Ž. (2012). Hydrochemical characterization of arsenic contaminated alluvial aquifers in Eastern Croatia using multivariate statistical techniques and arsenic risk assessment. *Science of The Total Environment*, 420, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.01.021>
- Wang, W., Chen, Y., Wang, W., Xia, Z., Li, X., & Kayumba, P. M. (2021). Hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in the dried-up river oasis of the Tarim Basin, Central Asia. *Journal of Arid Land*, 13(10), 977–994. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0086-1>
- Wu, J., Li, P., & Qian, H. (2015). Hydrochemical characterization of drinking groundwater with special reference to fluoride in an arid area of China and the control of aquifer leakage on its concentrations. *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 8575–8588. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4018-2>
- Xiao, Y., Shao, J., Frape, S. K., Cui, Y., Dang, X., Wang, S., & Ji, Y. (2018). Groundwater origin, flow regime and geochemical evolution in arid endorheic watersheds: a case study from the Qaidam Basin, northwestern China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(8), 4381–4400. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4381-2018>
- Xie, Y., Cook, P. G., Shanafield, M., Simmons, C. T., & Zheng, C. (2016). Uncertainty of natural tracer methods for quantifying river–aquifer interaction in a large river. *Journal of Hydrology*, 535, 135–147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.071>
- Yang, H., Zhang, X., & Zehnder, A. J. B. (2003). Water scarcity, pricing mechanism and institutional reform in northern China irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 61(2), 143–161. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00164-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00164-6)
- Yang, Q., Wang, L., Ma, H., Yu, K., & Martín, J. D. (2016). Hydrochemical characterization and pollution sources identification of groundwater in Salawusu aquifer system of Ordos Basin, China. *Environmental Pollution*, 216, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.076>
- Yin, L., Hou, G., Su, X., Wang, D., Dong, J., Hao, Y., & Wang, X. (2011). Isotopes (δD and $\delta^{18}O$) in precipitation, groundwater and surface water in the Ordos Plateau, China: implications with respect to groundwater recharge and circulation. *Hydrogeology Journal*, 19(2), 429–443. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0671-4>
- Yu, Y., Jin, Z., & Qiu, J. (2021). Global Isotopic Hydrograph Separation Research History and Trends: A Text Mining and Bibliometric Analysis Study. *Water*, 13(18), 2529. <https://doi.org/10.3390/w13182529>
- Zhang, J. Z., Srivastava, P. R., Sharma, D., & Eachempati, P. (2021). Big data analytics and machine learning: A retrospective overview and bibliometric analysis. *Expert Systems with Applications*, 184, 115561. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115561>

14 ANEXOS

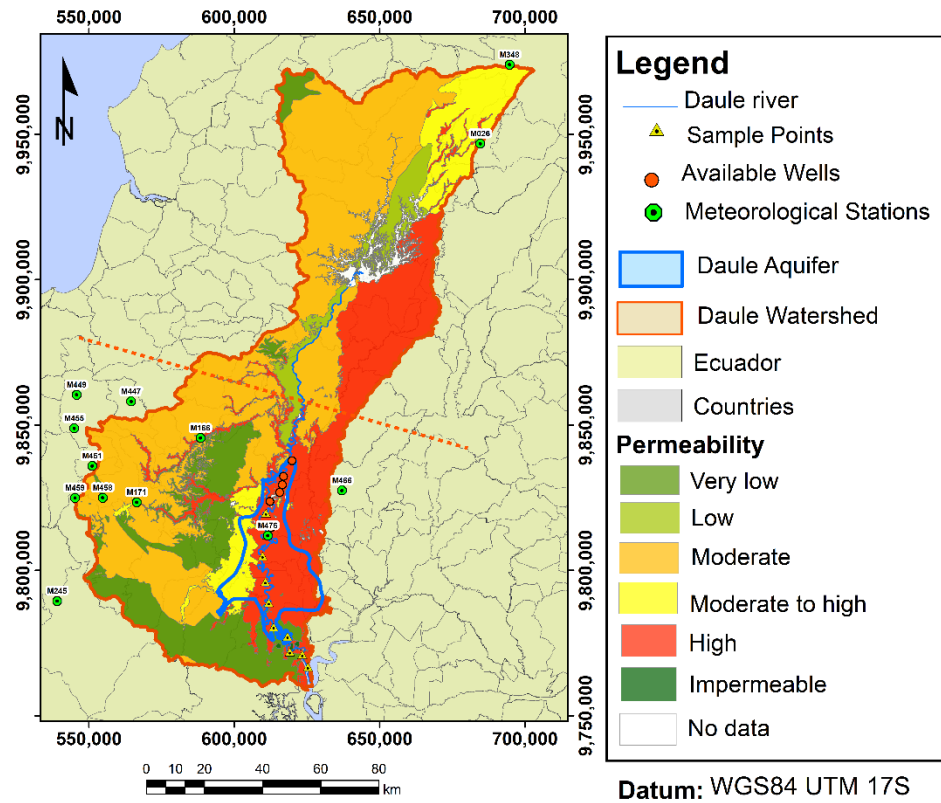


Figura 29. Mapa de permeabilidad en la subcuenca del río Daule

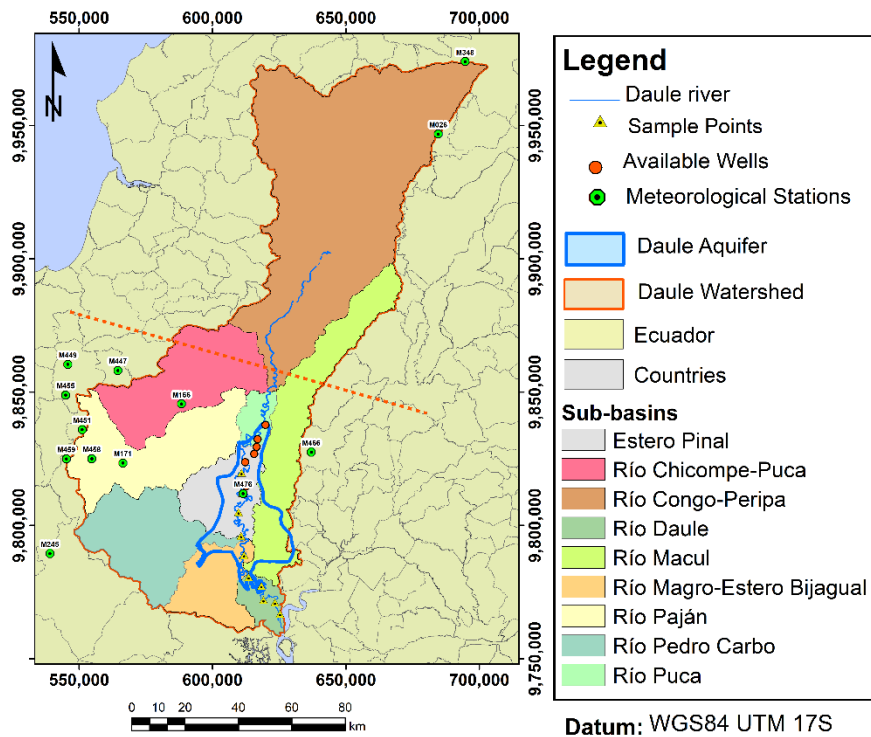


Figura 30. Subdivisión de subcuencas en la zona de estudio

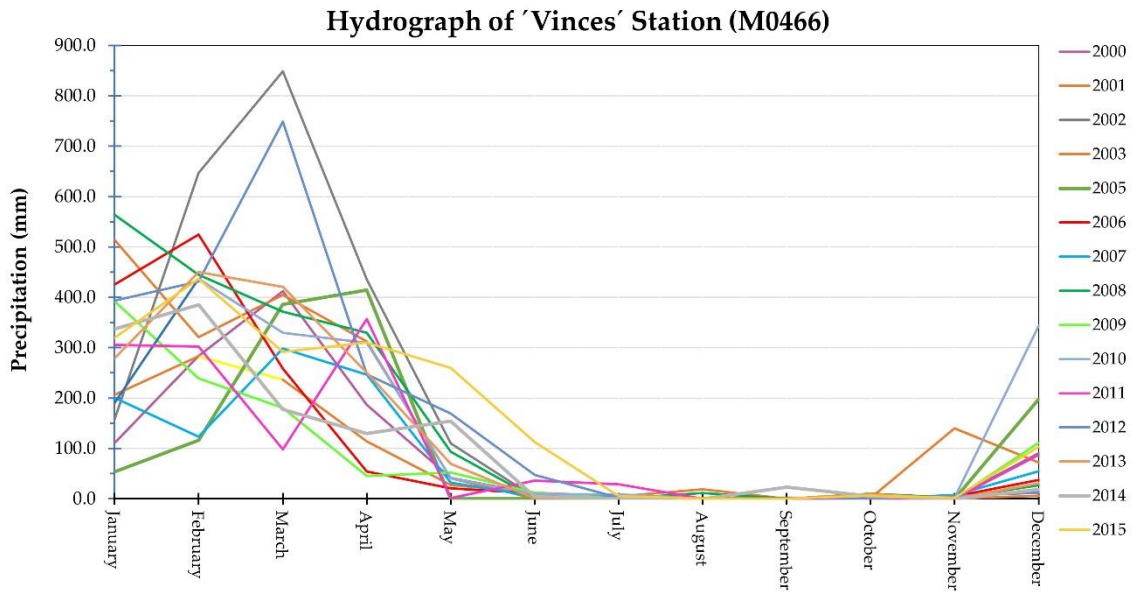


Figura 31. Precipitaciones mensuales históricas de la estación M0466

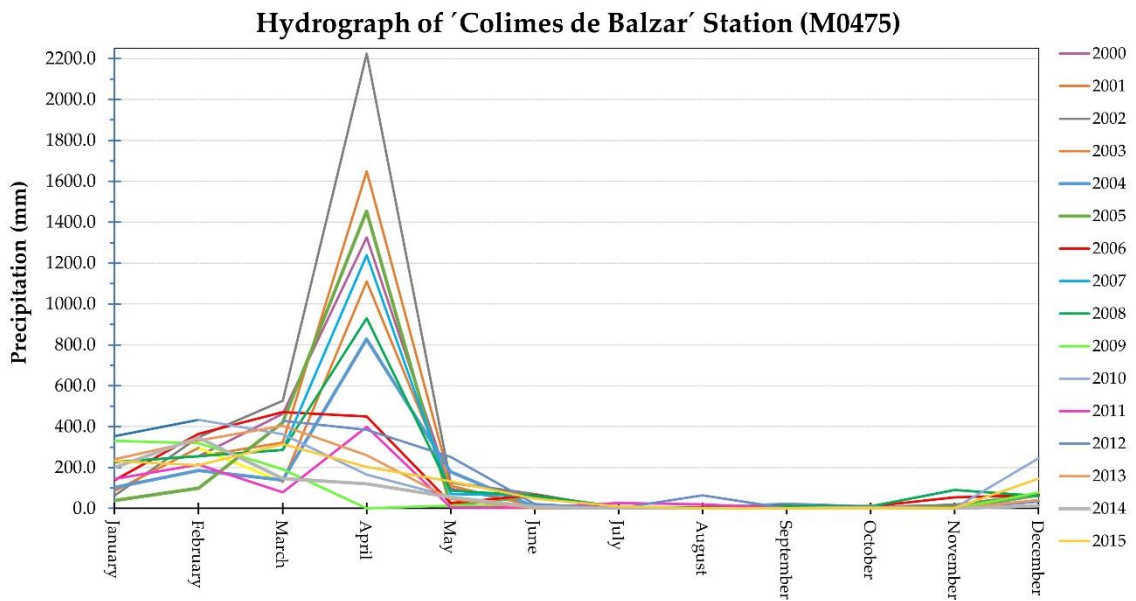


Figura 32. Precipitaciones mensuales históricas de la estación M0475

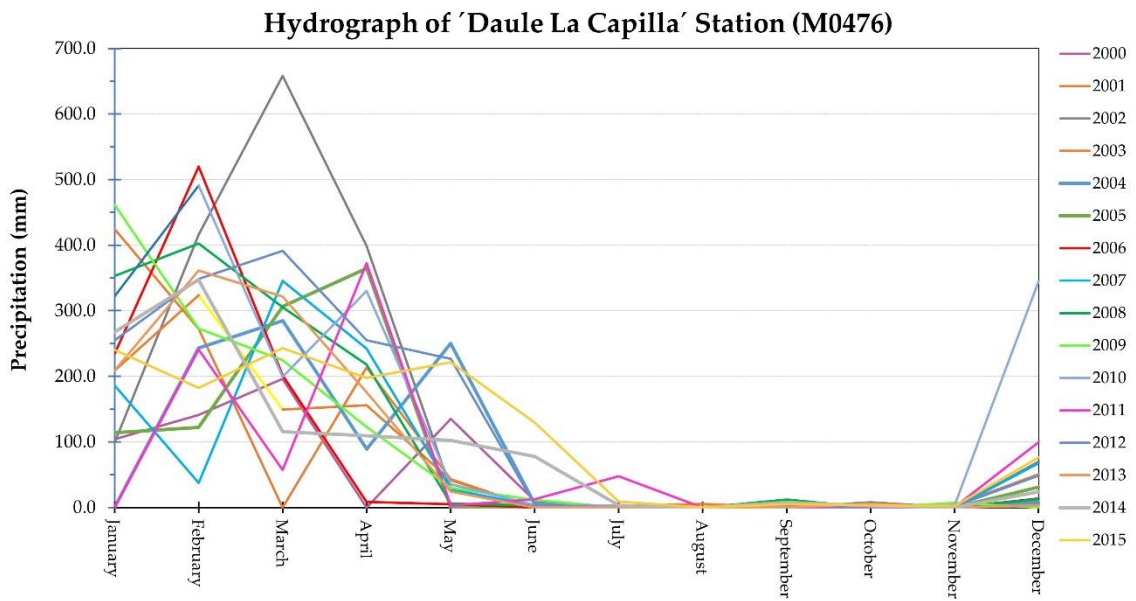


Figura 33. Precipitaciones mensuales históricas de la estación M0476

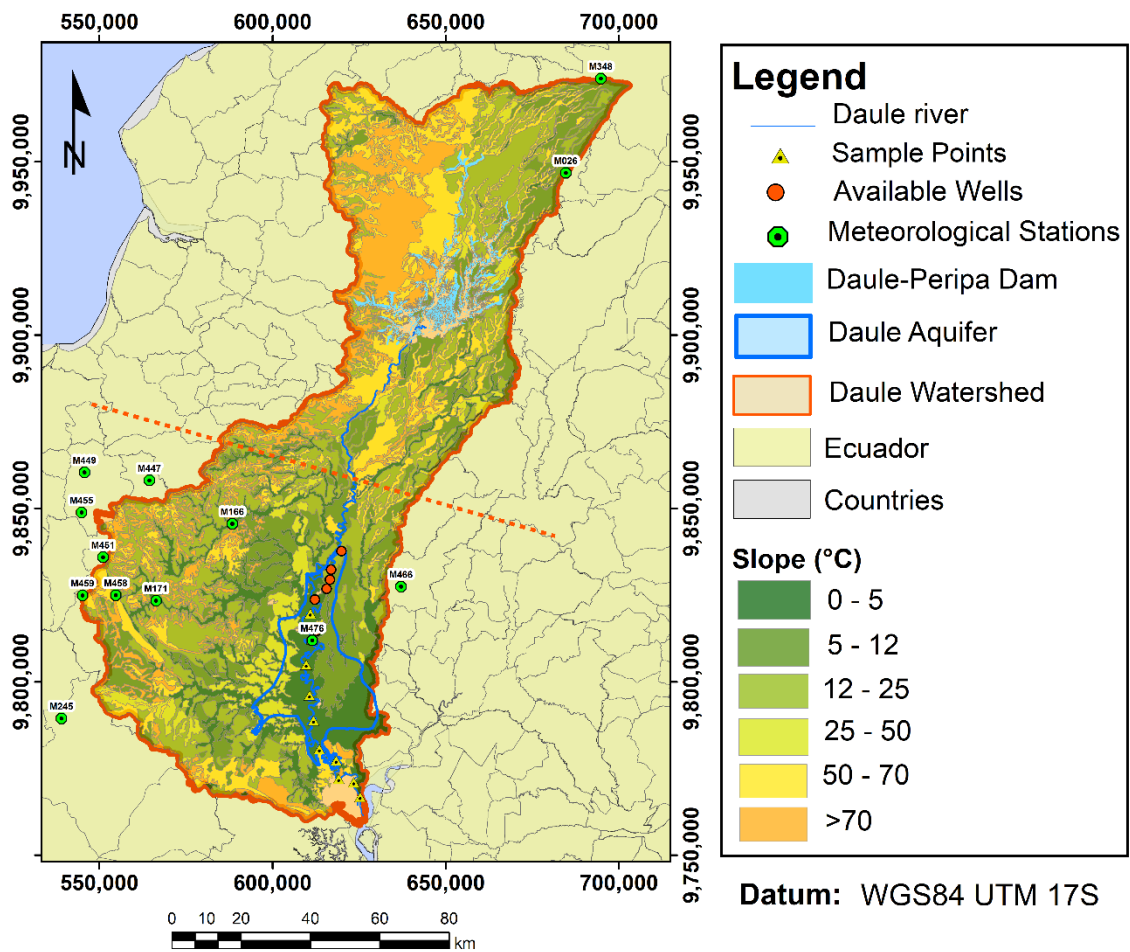


Figura 34. Mapa de pendientes de la zona de estudio

