

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Posgrados

Estado del arte de las aguas subterráneas en el Ecuador: un aporte para la gestión integrada del recurso acuífero.

Mecanismo de Titulación es: Mecanismo de Titulación de Investigación y Desarrollo

Tony Misael Giler Vera

**Daniela Rosero López, PhD.
Director de Trabajo de Titulación**

Trabajo de titulación de posgrado presentado como requisito
para la obtención del título de Magister en Soluciones Integrales para la Gestión del Agua

Quito, 14 de julio de 2025

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE POSGRADOS

HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**Estado del arte de las aguas subterráneas en el Ecuador: un aporte para
la gestión integrada del recurso acuífero**

Tony Misael Giler Vera

| | |
|---|--|
| Nombre del Director del Programa: | Valeria Ochoa Herrera |
| Título académico: | PhD. |
| Director del programa de: | Maestría de Soluciones Integrales. para la Gestión del Agua |
| | |
| Nombre del Decano del colegio Académico: | Eduardo Alba |
| Título académico: | PhD. |
| Decano del Colegio: | Ciencias e Ingeniería |
| | |
| Nombre del Decano del Colegio de Posgrados: | Darío Niebieskikwiat |
| Título académico: | PhD. |

Quito, julio de 2025

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombre del estudiante:

Tony Misael Giler Vera

Código de estudiante:

00344261

C.I.:

1314509371

Lugar y fecha:

Quito, 14 de julio de 2025.

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following graduation project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, por su amor incondicional, fortaleza y apoyo constante durante todo este proceso. También a todas las personas que me guiaron, enseñaron y motivaron a lo largo del camino y a quienes comparten el interés por conocer y proteger el agua.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la Universidad San Francisco de Quito por brindarme las herramientas académicas y humanas necesarias para el desarrollo de este trabajo. De manera especial, extendiendo mi gratitud a mi tutora, Daniela Rosero López, por su guía comprometida y su acompañamiento técnico y humano durante todo el proceso.

A mis docentes de la Maestría en Soluciones Integrales para la Gestión del Agua, quienes compartieron sus conocimientos con pasión y generosidad. Finalmente, gracias a cada persona e institución que aportó directa o indirectamente en la construcción de este trabajo, el cual busca contribuir a una gestión más sostenible del agua en el Ecuador.

RESUMEN

El presente trabajo analiza el estado actual del conocimiento sobre las aguas subterráneas en el Ecuador, integrando la revisión técnica de estudios hidrogeológicos con un análisis geoespacial de las captaciones registradas a nivel nacional. La investigación se desarrolla ante la necesidad de contar con herramientas técnicas actualizadas que permitan mejorar la planificación y gestión de este recurso estratégico. Mediante la sistematización de información secundaria y la elaboración de cartografía temática, se identificaron patrones espaciales de uso diferenciado, destacando una alta concentración de vertientes en la Sierra y una mayor intensidad de extracción por pozos en zonas costeras y periurbanas. Los resultados evidencian una gestión fragmentada, ausencia de monitoreo integral y vacíos de articulación institucional. Se concluye que la incorporación de análisis geoespacial e insumos cartográficos en los instrumentos de planificación territorial es clave para avanzar hacia una gestión técnica, preventiva y sustentable del agua subterránea en el país.

Palabras clave: aguas subterráneas, cartografía hidrogeológica, captaciones, pozos, vertientes

ABSTRACT

This paper analyzes the current state of knowledge regarding groundwater in Ecuador, integrating a technical review of hydrogeological studies with a geospatial analysis of nationally registered water intakes. The research arises from the need for updated technical tools that can improve the planning and management of this strategic resource. Through the systematization of secondary information and the development of thematic cartography, spatial patterns of differentiated use were identified, highlighting a high concentration of springs in the Sierra region and greater intensity of extraction by wells in coastal and peri-urban areas. The results reveal fragmented management, a lack of comprehensive monitoring, and gaps in institutional coordination. It is concluded that incorporating geospatial analysis and cartographic inputs into territorial planning instruments is crucial for advancing technical, preventive, and sustainable groundwater management in the country.

Key words: Groundwater, hydrogeological cartography, intakes, wells, springs

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| Resumen | 7 |
| Abstract | 8 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA | 15 |
| 2.1 Tipos de fuentes y criterios de selección | 15 |
| 2.2 Proceso de búsqueda temática | 16 |
| 2.3 Diseño y organización de la revisión | 16 |
| 2.3.1 Antecedentes y estudios institucionales | 16 |
| 2.3.2 Enfoques metodológicos aplicados y uso de herramientas SIG | 17 |
| 2.3.3 Estudios de caso regionales | 17 |
| 2.3.4 Aportes internacionales y experiencias comparables | 17 |
| 2.3.5 Conclusiones de la revisión | 18 |
| 3. METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN | 19 |
| 3.1 Justificación de la metodología seleccionada | 19 |
| 3.2 Herramientas de investigación y fuentes utilizadas | 19 |
| 3.3 Participantes en el estudio | 20 |
| 3.4 Recolección, limpieza y preparación de datos | 21 |
| 3.5 Consideraciones sobre replicabilidad | 21 |
| 4. ANÁLISIS DE DATOS | 22 |
| 4.1 Regiones fisiográficas del Ecuador | 26 |
| 4.2 Usos y consumos del Agua Subterránea | 27 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 45 |
| Referencias | 49 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Cuadro Resumen de Unidades Litológicas e Importancia Hidrogeológica | 24 |
| Tabla 2. Concesiones de aguas subterráneas por regiones geográficas..... | 28 |
| Tabla 3. Caudales de extracción de aguas subterráneas por regiones geográficas..... | 29 |
| Tabla 4. Representatividad de fuentes de agua subterránea por tipo de captación | 43 |
| Tabla 5. Caudales de extracción de aguas subterráneas por tipo de fuente..... | 43 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mapa de unidades litológicas e Importancia Hidrogeológica, en el anexo se encuentra la lámina complete con las descripciones de las unidades a detalle. Fuente: INAMHI con modificaciones propias. | 25 |
| Figura 2. Mapa de distribución de puntos de extracción de aguas subterráneas..... | 31 |
| Figura 3. Distribución del número de concesiones (pozos y vertientes) para todos los usos de acuerdo con cada provincia. | 32 |
| Figura 4. Caudales de aguas subterráneas asignados a los diferentes pozos distribuidos por provincia. | 34 |
| Figura 5. Distribución de usos y consumos de agua subterránea de acuerdo con las categorías asignadas en su registro oficial. | 35 |
| Figura 6. Distribución de los caudales de acuerdo con el uso y consumo de aguas subterráneas | 36 |
| Figura 7 Distribución de los caudales de acuerdo con el uso y consumo de aguas subterráneas en la región Amazónica | 37 |
| Figura 8 Distribución de los caudales de acuerdo con el uso y consumo de aguas subterráneas en la región Costa | 38 |
| Figura 9 Distribución de los caudales de acuerdo con el uso y consumo de aguas subterráneas en la región Sierra..... | 39 |
| Figura 10. Mapa de distribución de extracción de agua por vertientes..... | 40 |
| Figura 11. Mapa de distribución de extracción de agua por pozos | 41 |

1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea constituye un componente esencial para la sostenibilidad de los sistemas hídricos integrado, especialmente en regiones caracterizadas por una alta variabilidad climática, como ocurre en vastas zonas del territorio ecuatoriano (Benavides-Muñoz et al., 2024). Pese a su importancia estratégica, la gestión y el conocimiento del recurso hídrico subterráneo en Ecuador han sido históricamente limitados, lo cual ha conllevado a una extensiva explotación de los acuíferos con el riesgo creciente de deterioro de su calidad y cantidad (Carrión-Mero et al., 2021).

La caracterización de los sistemas acuíferos, su distribución geoespacial, los patrones de extracción, las capacidades de recarga y los usos del agua subterránea que se pueden realizar son aspectos críticos que, al ser conocidos y monitoreados adecuadamente, permiten una solución integral para la gestión del agua (Camacho & Cuesta, 2021; Gualli et al., 2023). Dentro de la gestión integral de los recursos hídricos (GIRH), el rol de la información hidrogeológica es fundamental, por lo que conocer de forma precisa y actualizada como contar con acceso permite sustentar adecuadamente los procesos de toma de decisiones basados en datos (Burbano et al., 2015; IIGE, 2022).

En Ecuador la información hidrogeológica sobre las disposición y estructura de los acuíferos a lo largo y ancho del territorio continental ha estado a cargo del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), con la misión de evaluar los recursos de agua subterránea. El primer mapa nacional fue generado en 1982 mediante colaboración y esfuerzos locales con el Instituto Geográfico Militar (IGM) (Burbano et al., 2015). A pesar de este importante insumo generado como la base cartográfica hidrogeológicas a nivel nacional, esta información no ha sido integrada a un plan nacional de GIRH y únicamente en ciertos casos se ha incorporado a las aguas subterráneas en la planificación local (Latina, 2009). Con énfasis en

la explotación de recurso geológicos se han realizado importantes esfuerzos de cooperación internacional y nacional en 2014 y 2017 para la actualización de los mapas hidrogeológicos, geológicos y metalogénicos a nivel nacional. A pesar de ello de acuerdo con Burbano et al. (2015) la mayor parte del territorio continental carece de estudios hidrogeológicos detallados y actualizados, lo que se intensifica en zonas rurales de la región Costa y Amazonía en donde existe una actividad extractiva de aguas subterráneas altamente dependiente de la disponibilidad del recurso. Este es el caso de sectores como Colonche, Olón, Salango y zonas de Manabí y Esmeraldas cuyo abastecimiento de agua para consumo humano y agrícola proviene casi exclusivamente de pozos perforados en los acuíferos desarrollados sobre los depósitos aluviales de la zona (Burbano et al., 2015, p. 37). Por otro lado, ciudades desarrolladas en torno al turismo, como Puerto López, Puerto Cayo, Machalilla, Canoa y Montañita han implementado mecanismos artesanales para suplir su demanda mediante la extracción de agua del acuífero de Ayampe, sin estudios sobre la dinámica intermitente de la cuenca superficial y la importancia del bosque en la zona de recarga. A diferencia de sectores y poblados de la región Costa, que dependen del agua subterránea durante la época seca, tanto poblados como asentamientos rurales de la región Sierra y la Amazonía, dependen de los pozos de agua, por su ubicación altitudinal frente a los sistemas de abastecimiento (Burbano et al., 2015). En la región Sierra y Amazonia los pozos de agua son más o menos explotables de acuerdo con la cercanía cuerpos de agua lénticos como pozas, lagos y lagunas por la superficialidad del nivel freático en estas zonas.

Actualmente, los diferentes esfuerzos han generado información dispersa con distintos niveles de profundidad y poco articulada que limita la comprensión del uso del recurso acuífero en distintas regiones del país. En ese sentido, es fundamental consolidar datos secundarios disponibles y representarlos espacialmente en sistemas de información geográfica como un

primer aporte técnico que contribuya al conocimiento del estado actual del recurso acuífero a nivel nacional. Bajo esta premisa, este estudio se fundamenta en la contribución que tiene un análisis técnico sobre las características generales y la distribución de las captaciones de agua subterránea en el Ecuador como un aporte parcial e insumo referencial para una futura actualización nacional del mapa hidrogeológico y la demanda y disponibilidad de agua subterránea en el país. En función de la premisa este trabajo se guía por la pregunta ¿Cuál es el estado actual del conocimiento sobre las aguas subterráneas, su distribución y los usos del agua en el Ecuador? A partir de ello, se plantea como objetivo general evaluar el estado del arte de las aguas subterráneas en Ecuador y georreferenciar las captaciones y usos, como una solución integral para la gestión sostenible del agua subterránea. Para alcanzar el objetivo general se plantean tres objetivos específicos: (i) sistematizar información secundaria relevante sobre estudios hidrogeológicos en el país; (ii) analizar geoespacialmente las captaciones de agua subterránea en el registro nacional; y (iii) proveer de recomendaciones integrales en función de las cartografías generadas para la toma de decisiones.

Para desarrollar la presente investigación se parte de la hipótesis exploratoria de que la información hidrogeológica secundaria y los datos geoespaciales disponibles permiten identificar patrones relevantes sobre el estado actual del uso y distribución del agua subterránea en Ecuador, siendo posible generar aportes significativos para su gestión sostenible.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Esta sección tiene como propósito explicar los parámetros bajo los cuales se desarrolló la revisión de literatura correspondiente a la presente investigación. Para ello, se detallan en primer lugar los tipos de fuentes utilizadas y los criterios de selección aplicados; posteriormente, se describe el proceso de búsqueda temática; y, finalmente, se justifica el diseño estructural adoptado para organizar los contenidos revisados. La revisión de literatura permite responder el primer objetivo específico correspondiente a sistematizar información secundaria relevante sobre estudios hidrogeológicos en el país.

2.1 Tipos de fuentes y criterios de selección

La revisión se fundamentó en el análisis de fuentes primarias y secundarias de carácter académico, técnico e institucional. Se incluyeron artículos científicos publicados en revistas indexadas, tesis de pre y posgrado, libros especializados, documentos técnicos y normativos emitidos por entidades públicas ecuatorianas como el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la Ex - Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) y la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). También se consultaron ponencias académicas presentadas en congresos de hidrogeología a nivel regional. Se priorizó el uso de literatura publicada entre los años 2010 y 2024, con énfasis en estudios aplicados al contexto ecuatoriano o a entornos geológicos y climáticos comparables de América Latina. La selección de fuentes respondió a criterios de pertinencia temática, actualidad científica, aplicabilidad metodológica y relevancia geográfica para la caracterización hidrogeológica en zonas de alta vulnerabilidad hídrica.

2.2 Proceso de búsqueda temática

Los temas incluidos en esta revisión fueron definidos a partir de palabras clave como: “acuíferos”, “hidrogeología”, “aguas subterráneas” “geoespacialidad de acuíferos”, “cartografía hidrogeológica”, “modelos conceptuales de acuíferos”, “vulnerabilidad y recarga”, “sistemas de información geográfica”, entre otras. Estas palabras clave fueron empleadas en motores de búsqueda académicos (Scopus, Web of Science, Google Scholar), catálogos bibliográficos universitarios y repositorios institucionales mencionados.

Asimismo, se exploraron las referencias bibliográficas citadas en artículos clave como los de Carrión-Mero et al. (2021), Zeydalinejad et al. (2024) y Kinoti et al. (2024), así como en documentos técnicos como el “Mapa Hidrogeológico del Ecuador” generado por el INAMHI en 1983 y las subsiguientes versiones hasta la de 2015 de la Ex -SENAGUA y ESPOL-TECH. También se incorporaron recomendaciones de docentes especializados en gestión hídrica y geociencias.

2.3 Diseño y organización de la revisión

La organización de la revisión responde a un diseño temático, que permite presentar de forma sistemática y secuencial los principales aportes documentados en la literatura científica y técnica. La revisión se divide en cinco componentes articulados entre sí:

2.3.1 Antecedentes y estudios institucionales

Presenta la evolución histórica de la generación de mapas hidrogeológicos en Ecuador, incluyendo la cartografía base del INAMHI (1983 y actualización 2015) el estudio elaborado por Ex - SENAGUA y ESPOL en 2014, así como los lineamientos técnicos más recientes del IIGE (2022) para la identificación de unidades hidrogeológicas y pozos de captación.

2.3.2 Enfoques metodológicos aplicados y uso de herramientas SIG

La literatura consultada evidencia que, para estudios de identificación de pozos y zonas de extracción de agua subterránea, es común el uso de metodologías que combinan datos de campo, cartografía geológica e hidrogeológica, e interpretación básica con apoyo de sistemas de información geográfica (SIG). Por ejemplo, trabajos desarrollados en zonas urbanas o rurales han utilizado mapas de litología superficial y puntos de captación para ubicar áreas con mayor potencial de aprovechamiento, sin necesidad de recurrir a modelaciones complejas. Estudios como el de Olivier et al. (2024) en Costa de Marfil muestran que, mediante prospecciones geoelectricas sencillas (VES) y análisis de fracturamiento, se puede optimizar la ubicación de perforaciones para mejorar la productividad de los pozos. Del mismo modo, en Ecuador, el INAMHI y el IIGE han implementado metodologías prácticas para caracterizar unidades hidrogeológicas, ubicar pozos existentes y definir zonas de influencia, utilizando bases de datos existentes y mapas de tipo litológico.

2.3.3 Estudios de caso regionales

Analiza las experiencias desarrolladas en provincias como Manabí, Santa Elena, Pichincha y Morona Santiago, donde se ha documentado la dependencia crítica del agua subterránea, especialmente en zonas rurales. Destacan las propuestas de delimitación funcional de unidades hidrogeológicas y caracterización geoelectrica como herramientas de soporte para la gestión y planificación territorial, principalmente a partir de la ubicación y evaluación de pozos, así como del análisis de la litología predominante.

2.3.4 Aportes internacionales y experiencias comparables

Si bien gran parte de la literatura internacional incluye desarrollos complejos como modelos tridimensionales y conceptualizaciones hidrogeológicas avanzadas, también existen

experiencias que ofrecen enfoques aplicables a contextos más sencillos. Por ejemplo, en el sistema acuífero transfronterizo de Stampriet, en África austral, se ha documentado el valor de integrar información geológica regional, mapas de uso de suelo y registros de perforaciones para mejorar el conocimiento del sistema subterráneo sin requerir simulaciones numéricas sofisticadas. Asimismo, el estudio sobre el acuífero kárstico de los Montes Avella (Italia) destaca cómo una revisión bibliográfica estructurada y el análisis espacial básico permiten entender los patrones generales de recarga y flujo, así como orientar la protección de fuentes estratégicas para el abastecimiento humano. Estos enfoques son particularmente útiles como referencia para estudios de identificación de zonas de captación o monitoreo, como el que se plantea en esta investigación.

2.3.5 Conclusiones de la revisión

Finalmente, se ofrece una síntesis crítica de los principales hallazgos, identificando vacíos de información científica, fortalezas metodológicas detectadas y la necesidad de consolidar redes de monitoreo hidrogeológico en el país. Esta revisión constituye un insumo clave para sustentar el marco teórico y metodológico del presente estudio y orientar futuras investigaciones aplicadas a la gestión sostenible de aguas subterráneas.

3. METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación adopta un enfoque metodológico de carácter documental, descriptivo y analítico, orientado a la sistematización de fuentes secundarias oficiales, literatura científica indexada, bases de datos espaciales y cartografía técnica relacionadas con las aguas subterráneas en el Ecuador. Esta metodología guarda plena concordancia con las convenciones científicas propias de la hidrogeología aplicada cuyo propósito fundamental es consolidar, representar y analizar la información existente sobre captaciones, usos y unidades hidrogeológicas en el territorio ecuatoriano.

3.1 Justificación de la metodología seleccionada

Dado que el objeto de estudio es la caracterización y análisis del conocimiento disponible sobre las aguas subterráneas en el país, se adoptó una metodología documental que permite responder de manera eficaz a la pregunta de investigación planteada. La elección de este enfoque se sustenta en su capacidad para articular múltiples fuentes de tipo institucional, científico y cartográfico y derivar de ello conclusiones pertinentes mediante un tratamiento sistemático. Además, este tipo de metodología permite replicabilidad, control de sesgos, y una trazabilidad técnica sólida. El empleo de herramientas de análisis espacial como el programa ArcGIS Pro resulta clave para la representación geográfica de las captaciones subterráneas, la delimitación funcional de los acuíferos y la identificación de patrones espaciales de uso y potencial vulnerabilidad del recurso.

3.2 Herramientas de investigación y fuentes utilizadas

La recolección de datos se basó en fuentes verificables y técnicas, entre las que se destacan:

- Mapa Hidrogeológico Nacional a escala 1:250.000 (ESPOL-TECH E.P et al., 2014), el cual constituye la referencia cartográfica principal por su actualización, para la delimitación de unidades hidrogeológicas, basado en criterios litológicos, geomorfológicos y estructurales.
- Estudio Nacional de Aguas Subterráneas del INAMHI (Burbano et al., 2015), que proporciona información técnico-hidrogeológica a nivel nacional, incluyendo parámetros como transmisividad, tipo de porosidad y características litológicas de los principales acuíferos.
- Base de datos de captaciones subterráneas de la Agencia de Regulación y Concesiones de Agua que inicialmente incluía más de 98.000 registros, pero que luego de una exhaustiva depuración, se conservaron 44.000 registros válidos.
- Artículos científicos indexados que contextualizan y validan las estrategias metodológicas, tales como los trabajos de Carrión-Mero et al. (2021), (Herrera-Franco et al. (2024) y Guzmán et al. (2016) entre otros.

3.3 Participantes en el estudio

Al tratarse de una investigación de carácter documental, no se contempló la participación de sujetos humanos o grupos poblacionales. Sin embargo, los registros procesados corresponden a miles de puntos de captación distribuidos en todas las regiones del país, los cuales representan usos variados (ejem., domiciliario, agrícola, industrial, institucional, entre otros). En este sentido, aunque no se trata de participantes activos, la información reviste un alto valor representativo en cuanto a distribución espacial y tipo de aprovechamiento del agua subterránea.

3.4 Recolección, limpieza y preparación de datos

Los documentos fueron obtenidos de fuentes institucionales oficiales, como repositorios del IIGE, SENAGUA, MAATE, ESPOL e INAMHI, así como de revistas científicas indexadas en bases como Scopus y ScienceDirect. La validez de las fuentes fue verificada mediante criterios de actualidad (2000–2024), rigurosidad científica (revisión por pares o validación institucional), y pertinencia geográfica. Respecto al archivo del ARCA, se aplicó una limpieza exhaustiva que incluyó:

- Eliminación de registros duplicados o sin información crítica
- Descarte de captaciones de aguas superficiales
- Compleción de campos faltantes mediante cruce con fuentes adicionales
- Estandarización de variables como uso, tipo de fuente, caudal, región, institución responsable y año de concesión
- Finalmente, los datos fueron georreferenciados y tratados en ArcGIS Pro, generando capas vectoriales temáticas para su posterior análisis espacial

3.5 Consideraciones sobre replicabilidad

La estrategia metodológica implementada es replicable en otras regiones hidrogeológicas del país o de América Latina, siempre que se cuente con acceso a datos homologables. La claridad en los criterios de inclusión, exclusión, clasificación y análisis asegura la transparencia del procedimiento, permitiendo validar y auditar los resultados sin incurrir en sesgos. Esto refuerza la utilidad del estudio como base para el diseño de políticas públicas o investigaciones futuras orientadas a la gestión integral del recurso hídrico subterráneo.

4. ANÁLISIS DE DATOS

El análisis de datos constituye una etapa clave en el desarrollo de la presente investigación, en tanto permite interpretar de manera estructurada y coherente la información hidrogeológica obtenida. El análisis de datos permite responder el objetivo específico de *Analizar geoespacialmente las captaciones de agua subterránea en el registro nacional*. A partir de los datos recopilados mediante fuentes secundarias oficiales —como mapas litológicos, hidrogeológicos, registros de pozos existentes e informes institucionales— se realizó una evaluación integrada de las características de los sistemas acuíferos. En este sentido, se analizó la distribución espacial de las unidades geológicas con potencial hidrogeológico, su relación con la topografía, la cobertura superficial y la localización de captaciones. Este procedimiento permitió identificar las áreas de mayor susceptibilidad a la infiltración, posibles zonas de recarga, y sectores con aprovechamiento del agua subterránea, contribuyendo así a una comprensión más precisa del funcionamiento hidrogeológico del área de estudio. A lo largo de este capítulo se presentan los resultados de manera descriptiva, apoyados por representaciones cartográficas y cuadros interpretativos que permiten sustentar las conclusiones del estudio.

La cartografía hidrogeológica del Ecuador clasifica las formaciones geológicas en función de su litología y su capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea (Carrión-Mero et al., 2021). Esta clasificación (Tabla 1) distingue entre unidades con importancia hidrogeológica y aquellas sin valor para la explotación del recurso hídrico subterráneo. Las unidades litológicas con importancia hidrogeológica se subdividen según el tipo de permeabilidad:

- Permeabilidad primaria (porosidad intergranular)

Corresponde principalmente a sedimentos clásticos no consolidados o parcialmente consolidados, como arenas y conglomerados del Cuaternario y Terciario. Estas unidades, presentes en cuencas y valles interandinos, conforman acuíferos de extensión regional o local, generalmente explotables mediante pozos (Tabla 1) (Carrión-Mero et al., 2021; Herrera-Franco et al., 2024).

- Permeabilidad secundaria (fisuración o karstificación)

Asociada a rocas volcánicas, cataclásticas y sedimentarias duras, que permiten el paso del agua a través de fracturas. La presencia de acuíferos en este grupo es más restringida y localizada, con explotaciones puntuales a través de manantiales o pozos en zonas fracturadas (Tabla 1) (Carrión-Mero et al., 2021).

En contraste, las unidades litológicas sin importancia hidrogeológica comprenden formaciones con muy baja o nula permeabilidad. Se clasifican como:

Acuícludos: que pueden almacenar agua, pero no transmitirla, como las arcillas y lutitas.

Acuífugos: constituidos por rocas ígneas y metamórficas masivas, prácticamente impermeables y sin capacidad de almacenamiento ni transmisión del recurso.

Para una interpretación clara del potencial hidrogeológico de las diferentes formaciones, se distingue la complejidad geodinámica del Ecuador que se manifiesta en una gran diversidad geológica estructural y litológica (Figura 1). El territorio continental se encuentra atravesado por la Cordillera de los Andes, que lo divide en tres grandes regiones fisiográficas: la Costa, la Sierra y la Amazonía. Esta configuración es el resultado de procesos tectónicos, volcánicos y sedimentarios que se han desarrollado desde el Paleozoico hasta el Cuaternario.

Tabla 1. Cuadro Resumen de Unidades Litológicas e Importancia Hidrogeológica

| Tipo de permeabilidad | Litología Dominante | Permeabilidad | Importancia hidrogeológica | Clasificación Técnica |
|---|--|--------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Primaria (Porosidad Intergranular) | Rocas clásticas no consolidadas (edad Cuaternaria) | Muy alta | Alta (Acuíferos regionales y locales) | A1 |
| | Sedimentos clásticos semi-consolidados y consolidados (areniscas, conglomerados) | Alta a media | Alta (Acuíferos explotables) | A2 |
| | Sedimentos clásticos con arcillas, limos, tobas | Media a baja | Moderada (Acuíferos discontinuos) | A3 |
| Secundaria (Fisuración / Karstificación) | Rocas volcánicas recientes fracturadas | Alta | Moderada-Alta (Zonas fracturadas) | V1 |
| | Rocas cataclásticas, calizas, piroclásticas (fracturas e intemperismo) | Media | Moderada (Acuíferos locales) | V2 |
| | Porfiritas, diabasas, cuarcitas, lutitas, pizarras | Baja | Baja (Solo manantiales puntuales) | V3 |
| Impermeables | Arcillas y lutitas (sedimentos consolidados o no consolidados) | Muy baja | Escasa (Acuícludos) | C1 |
| | Granitos, riolitas, granodioritas, rocas metamórficas masivas | Prácticamente nula | Nula (Acuífugos) | C2 |

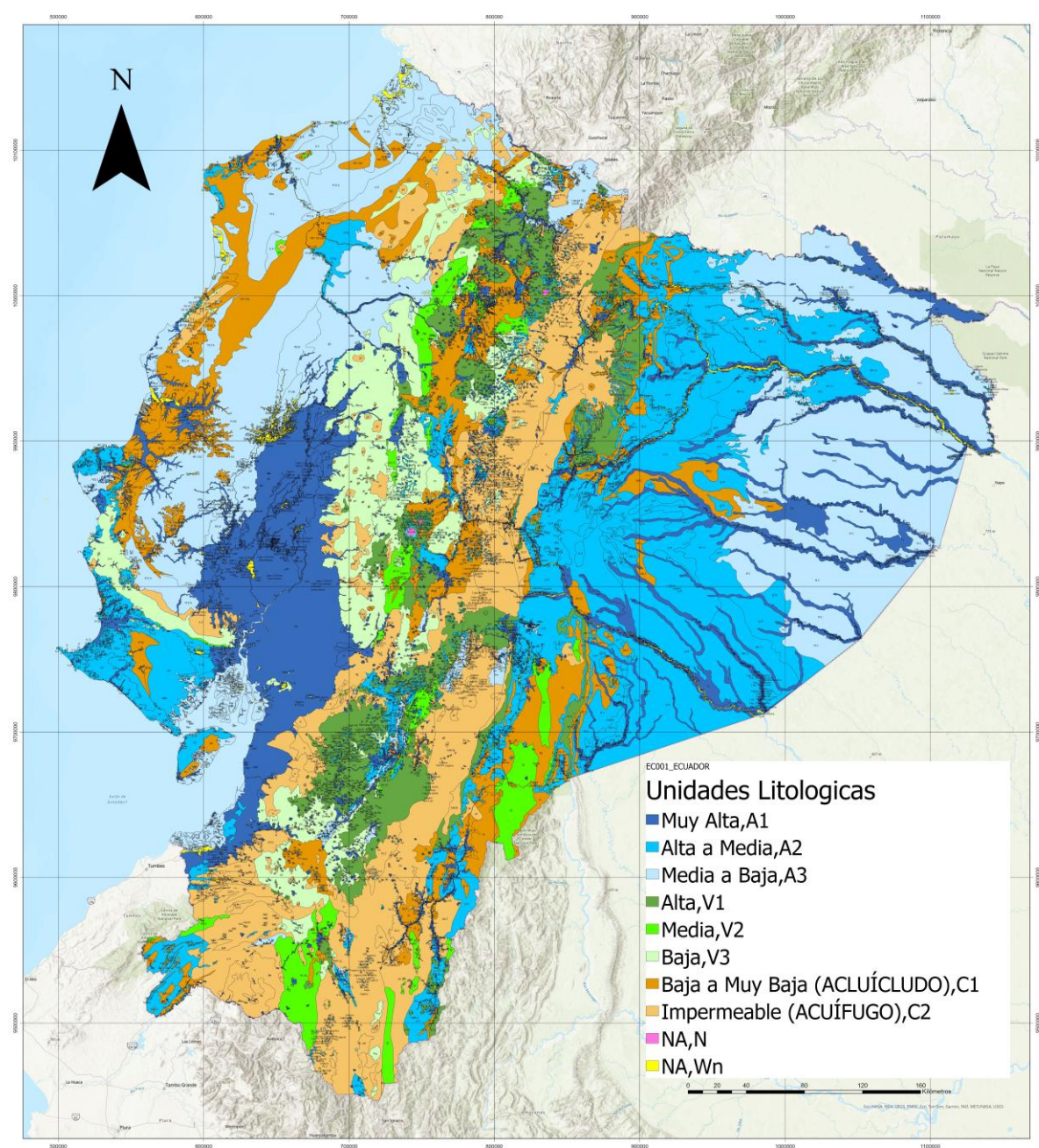


Figura 1. Mapa de unidades litológicas e Importancia Hidrogeológica, en el anexo se encuentra la lámina completa con las descripciones de las unidades a detalle. Fuente: INAMHI con modificaciones propias.

4.1 Regiones fisiográficas del Ecuador

Esta caracterización geológica es fundamental para la comprensión de los sistemas hidrogeológicos del país, ya que la litología, estructura tectónica y edad de las formaciones condicionan directamente la existencia, extensión, tipo y productividad de los acuíferos (Tabla 1).

Región Costa: Presenta una amplia llanura sedimentaria constituida por materiales detríticos, en su mayoría clásticos de origen cuaternario y terciario, con fuerte influencia volcánica desde la Sierra. Estas condiciones han permitido el desarrollo de acuíferos de gran extensión y buena productividad, principalmente por porosidad intergranular.

Región Sierra: Se caracteriza por la presencia de dos cordilleras paralelas (Occidental y Real) separadas por el Valle Interandino. Las rocas aflorantes incluyen desde unidades metamórficas paleozoicas hasta formaciones volcánicas cenozoicas. La conformación geológica da lugar a acuíferos locales, tanto por porosidad primaria como por fisuración, muchas veces confinados en estructuras tectónicas.

Región Amazónica: Está conformada por una extensa cuenca sedimentaria, con depósitos gruesos de origen continental y marino. En esta región predominan los acuíferos por porosidad intergranular, confinados en unidades de gran espesor. La cobertura vegetal densa y los altos índices de precipitación favorecen la recarga natural de los acuíferos.

Desde la elaboración del primer Mapa Hidrogeológico Nacional a escala 1:1'000.000 en 1983 por el INAMHI, PRONAREG, UNESCO y ORSTOM, el país ha experimentado ciertos avances en la representación del recurso hídrico subterráneo, aunque estos han sido puntuales y no homogéneos. El mapa de 1983 se basó principalmente en información litológica e inferencias sobre la permeabilidad de las formaciones geológicas. Contaba con datos muy limitados sobre aguas subterráneas directas: apenas se incluyeron 31 pozos representativos y

algunas vertientes seleccionadas, sin una red nacional de observación ni mediciones sistemáticas (Burbano, Cuenca & Loaiza, 2015).

En 2014, una actualización fue realizada por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) y ESPOL-TECH EP, con una mejora significativa en escala (1:250.000) y la incorporación de validaciones y estudios de campo en zonas específicas como Guayas, Napo, Santa Elena y Manabí. Esta nueva versión permitió representar con mayor detalle algunas unidades litológicas con potencial acuífero, definir condiciones de confinamiento y sugerir zonas prioritarias para la gestión del recurso subterráneo.

Sin embargo, el cambio entre los dos mapas no fue integral ni uniforme a nivel nacional. Muchas regiones del país siguen representadas con base en criterios generales del mapa de 1983. El estudio de Burbano, Cuenca y Loaiza (2015) aportó una caracterización más técnica de ciertos acuíferos mediante análisis hidroquímicos, levantamientos geofísicos e inventarios de pozos, pero su cobertura fue limitada a áreas específicas. Además, hasta la fecha no se ha implementado una red nacional de monitoreo de aguas subterráneas, lo cual sigue limitando la generación de datos sistemáticos y actualizados para la toma de decisiones.

4.2 Usos y consumos del Agua Subterránea

El estudio del uso del agua subterránea constituye un componente esencial en la caracterización de los sistemas hídricos del país, dado que permite comprender no solo la distribución espacial de las captaciones, sino también la presión ejercida sobre los acuíferos y la finalidad de su explotación. Esta sección presenta un análisis integral de los diferentes tipos de uso registrados a nivel nacional, tanto en términos cuantitativos como funcionales, diferenciando el comportamiento por regiones, provincias, caudales extraídos y fuentes de captación (pozos o vertientes). La información ha sido representada mediante gráficos de barras

y pastel, los cuales han sido complementados con una interpretación narrativa detallada, que permite extraer conclusiones relevantes para la gestión técnica del recurso.

Los datos reflejan una alta heterogeneidad en el uso del agua subterránea, con predominancia del uso doméstico en la región Sierra, fuerte presencia del uso agrícola en la Costa, y una distribución más dispersa en la Amazonía (Tabla 2).

Tabla 2. Concesiones de aguas subterráneas por regiones geográficas

| Región | Fuentes de extracción de agua subterránea (No.) | Proporción (%) |
|---------------|--|-----------------------|
| Amazónica | 4792 | 11% |
| Costa | 4205 | 9% |
| Sierra | 35479 | 80% |

Los resultados de las fuentes como el número de puntos de extracción por regiones muestran una clara concentración en la región Sierra, la cual representa el 80% del total de puntos inventariados. Esta elevada proporción puede explicarse por la topografía montañosa de esta región, la cual favorece la presencia de acuíferos locales que han sido históricamente aprovechados, especialmente en los valles interandinos. La Amazonía, a pesar de contar con una gran disponibilidad hídrica superficial, presenta el 11% de los puntos de captación subterránea, lo cual podría deberse a factores como la baja densidad poblacional, la alta cobertura boscosa y el acceso a fuentes superficiales. En contraste, la Costa representa apenas el 9%, posiblemente porque muchos asentamientos dependen de acuíferos costeros, pero con menores puntos formalmente registrados, o por la preferencia histórica del uso de agua superficial en sistemas de riego.

En cuanto a los volúmenes extraídos, se observa una distribución distinta respecto al número de fuentes de captación. Los caudales de extracción por región revelan que, aunque la región Sierra concentra la mayor cantidad de puntos de captación, la región Costa presenta una participación proporcionalmente más significativa en términos de volumen extraído. Cabe señalar que esta afirmación parte del análisis de los caudales registrados (l/s), sin contar con datos uniformes sobre los tiempos efectivos de extracción diaria, mensual o anual. Por tanto, se asume —como hipótesis metodológica— que las condiciones de operación son comparables entre regiones, permitiendo establecer tendencias relativas, aunque no volúmenes exactos.

Además, debe considerarse que los caudales concesionados en litros por segundo (l/s) se calculan a partir de la demanda diaria de agua estimada por el usuario, asumiendo un régimen operativo constante de 24 horas, a menos que se indique lo contrario. En la práctica, el tiempo de extracción puede variar significativamente, lo que influye en el volumen realmente captado. Por ello, el caudal debe interpretarse como un valor de referencia y no como una medida precisa del volumen total extraído sin considerar la duración efectiva de operación. Esta diferenciación sugiere patrones de uso más intensivo en ciertas zonas, posiblemente asociados a demandas agrícolas o industriales de mayor escala.

Tabla 3. Caudales de extracción de aguas subterráneas por regiones geográficas

| Región | Caudal de Extracción (l/s) | Proporción (%) |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Amazónica | 12351.52 | 14.4% |
| Costa | 21810.02 | 25.4% |
| Sierra | 51818.21 | 60.2% |

Tal como se muestra en la Tabla 3, la región Sierra mantiene el mayor caudal de extracción, con un 60,2% del total nacional, lo cual es coherente con su densidad poblacional

y concentración de centros urbanos, además del uso doméstico predominante. No obstante, la Costa, con solo el 9% de los puntos de captación (ver Tabla 2), representa el 25,4% del caudal total, lo que evidencia una alta intensidad de uso por punto, probablemente destinada al riego tecnificado o a zonas agrícolas de gran escala. En el caso de la Amazonía, si bien registra el 11% de las fuentes, su participación en términos de caudal alcanza el 14,4%, lo cual refleja que, aunque el número de captaciones es limitado, existen aprovechamientos significativos en ciertos sectores estratégicos.

Esta relación entre número de fuentes y volumen extraído subraya la importancia de considerar no solo la cantidad de captaciones, sino también la magnitud de los caudales comprometidos, como criterio para la planificación y regulación del recurso hídrico subterráneo.

La distribución espacial de los puntos de extracción de aguas subterráneas en el Ecuador evidencia patrones directamente asociados a la densidad poblacional y al uso intensivo del recurso. Como se observa en la Figura 2, los pozos se concentran de manera significativa en la región Sierra, especialmente en los valles interandinos y zonas urbanas como Quito, Cuenca y Ambato.

Sin embargo, también se destacan provincias como Cotopaxi, que presentan una alta densidad de captaciones subterráneas a pesar de tener centros urbanos menos poblados. Esta concentración puede explicarse por el uso agrícola intensivo, especialmente en actividades de riego para cultivos de ciclo corto y mediano, y en zonas con presión hídrica superficial limitada, lo que incrementa la dependencia del recurso subterráneo para garantizar la producción agropecuaria.

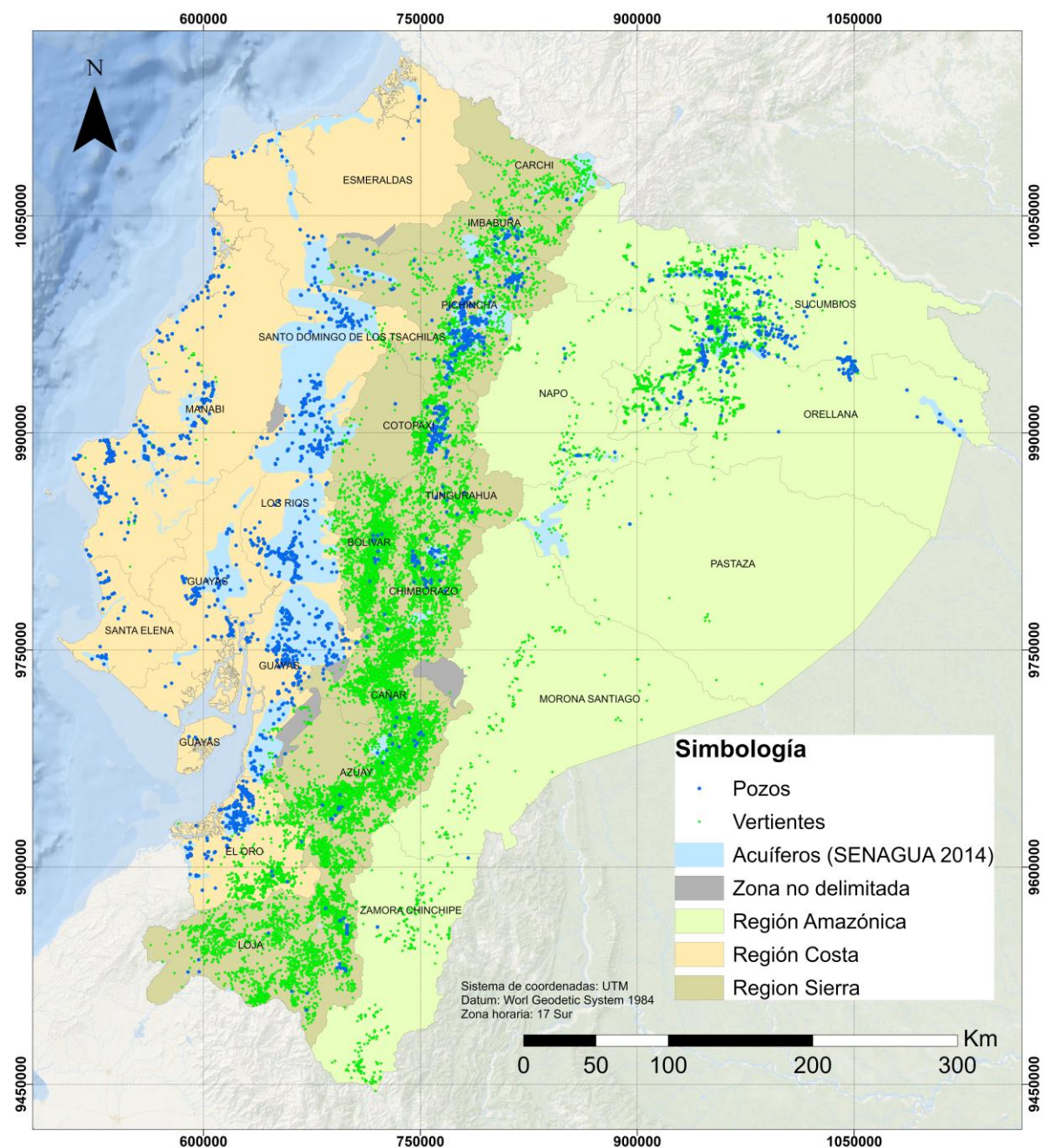


Figura 2. Mapa de distribución de puntos de extracción de aguas subterráneas

Este mapa constituye el producto cartográfico más actualizado sobre el inventario nacional de pozos, integrando datos oficiales y académicos recientes. Su nivel de detalle y cobertura supera a los estudios anteriores, como el Mapa Hidrogeológico Nacional elaborado

por el INAMHI y la DGGM en 1983 (escala 1:1.000.000), así como la versión desarrollada por SENAGUA y ESPOL-TECH EP en 2014 (escala 1:250.000), los cuales si bien fueron fundamentales en su momento, no reflejaban la presión actual sobre los acuíferos ni los usos específicos del recurso.

La información representada en la Figura 2 permite identificar zonas de alta concentración de captaciones, lo que implica un riesgo potencial en términos de sobreexplotación y vulnerabilidad a la contaminación, particularmente en áreas donde las zonas de recarga se superponen con asentamientos humanos o actividades agrícolas. Esta situación subraya la necesidad urgente de fortalecer los mecanismos de planificación, control y protección del agua subterránea, especialmente en regiones donde el recurso está sometido a una alta presión antrópica.

A partir del análisis de los usos por regiones fue posible identificar la distribución de los puntos de extracción (Pozos y vertientes) por provincias al incluir todos los puntos en su conjunto (Figura 3).

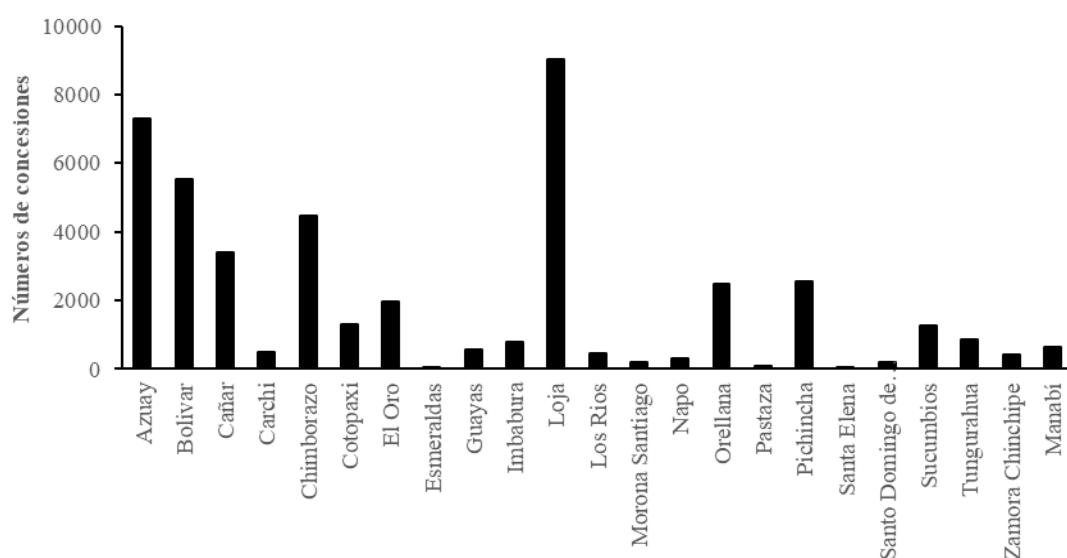


Figura 3. Distribución del número de concesiones (pozos y vertientes) para todos los usos de acuerdo con cada provincia.

La distribución de puntos de extracción por provincias, representada en la Figura 3, revela una concentración significativa en territorios como Loja, Bolívar, Azuay y Chimborazo. Esto puede asociarse tanto a factores geológicos —como la presencia de acuíferos productivos— como a factores socioeconómicos, tales como la necesidad de garantizar el abastecimiento en zonas rurales con limitada infraestructura de agua potable.

Resulta particularmente destacable la baja representación de puntos de extracción asignados o identificados en provincias como Santa Elena, Sucumbíos o Santo Domingo, lo cual podría responder a vacíos de información, menor densidad poblacional o a una mayor dependencia de fuentes superficiales como ríos o sistemas de distribución regional.

Adicionalmente, es importante considerar que la extracción de agua subterránea —especialmente en acuíferos profundos o de difícil acceso— conlleva costos técnicos y económicos más elevados, tanto en términos de infraestructura de perforación como de operación y mantenimiento. Este factor puede actuar como una barrera para su aprovechamiento en zonas donde existen fuentes superficiales más accesibles o donde los recursos financieros limitan el desarrollo de captaciones subterráneas.

Luego de analizar el caudal de aguas subterráneas asignados a cada provincia, se observa que Bolívar, Pichincha y Guayas lideran el volumen de extracción de agua subterránea (Figura 4). Esto podría deberse tanto a una mayor densidad de captaciones como a una explotación más intensiva por parte de centros urbanos e industrias localizadas en estas jurisdicciones. En contraste, provincias como Santa Elena, Sucumbíos o El Oro presentan caudales significativamente menores, posiblemente debido a una menor dependencia del recurso subterráneo o a una disponibilidad superficial más accesible.

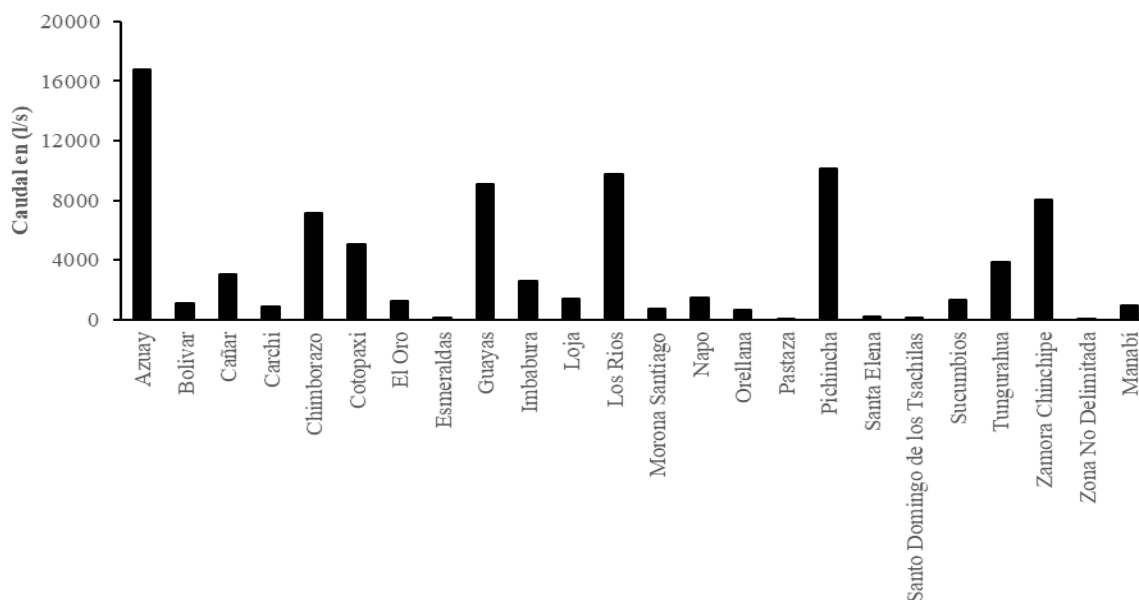


Figura 4. Caudales de aguas subterráneas asignados a los diferentes pozos distribuidos por provincia.

El análisis de la distribución de usos reveló que el principal destino del agua subterránea es el consumo humano, con un 47% del total, lo cual refleja su papel esencial en el abastecimiento básico en zonas donde el acceso a agua superficial es limitado o estacional. En segundo lugar, el agua subterránea es utilizada para abrevaderos (24%) y riego (18%), indicando también su relevancia en las actividades agropecuarias. Usos industriales e hidroeléctricos presentan porcentajes muy bajos, lo cual puede interpretarse como una baja presión del sector productivo sobre los acuíferos, o bien una preferencia de este sector por otras fuentes (Figura 5).

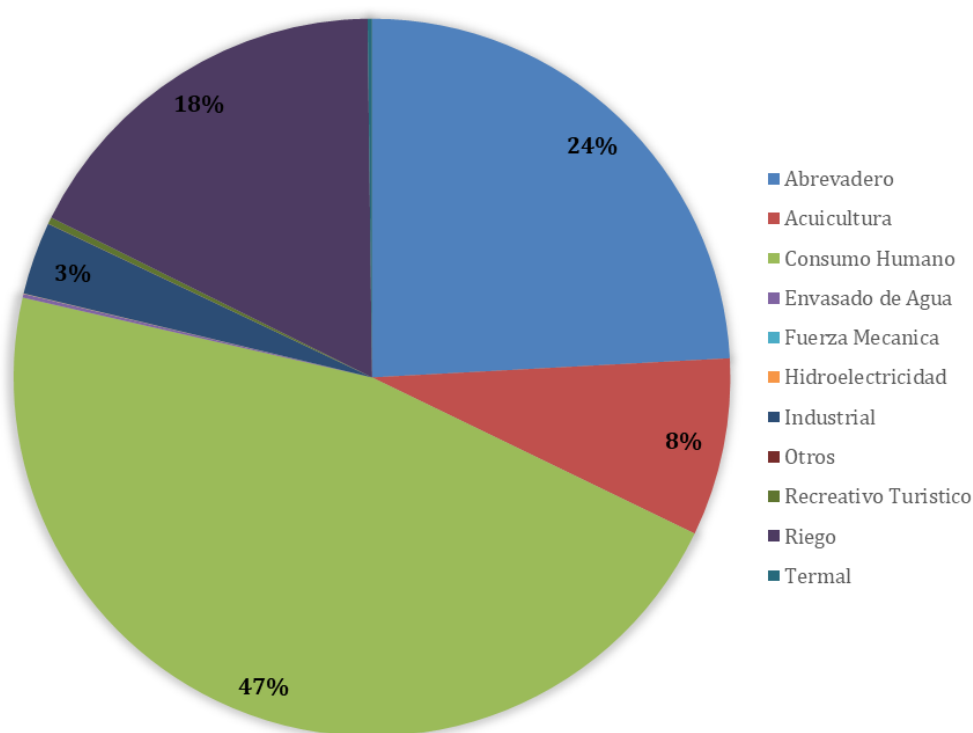


Figura 5. Distribución de usos y consumos de agua subterránea de acuerdo con las categorías asignadas en su registro oficial.

Según el análisis de caudal por uso, correspondiente exclusivamente a las extracciones de agua subterránea, se reafirma el peso de este recurso en actividades agrícolas, ya que el 43% del caudal total extraído se destina al riego (Figura 6). El consumo humano representa el 38%, y la generación hidroeléctrica el 10%, lo cual indica un equilibrio entre la demanda productiva y doméstica.

Esta distribución se diferencia de la presentada anteriormente —donde el riego representaba el 18%— debido a que aquel análisis se basaba en el número de puntos de extracción registrados por uso, mientras que el actual se fundamenta en el volumen de caudal extraído por uso. Esto pone en evidencia que, aunque existen menos captaciones destinadas al riego en comparación con otros usos, el volumen de agua que se extrae para esta actividad es

significativamente mayor, lo cual refleja su peso dentro del uso intensivo del recurso subterráneo. Asimismo, la baja representación de otros usos, como acuicultura, industria y uso termal, sugiere una diversificación limitada del recurso.

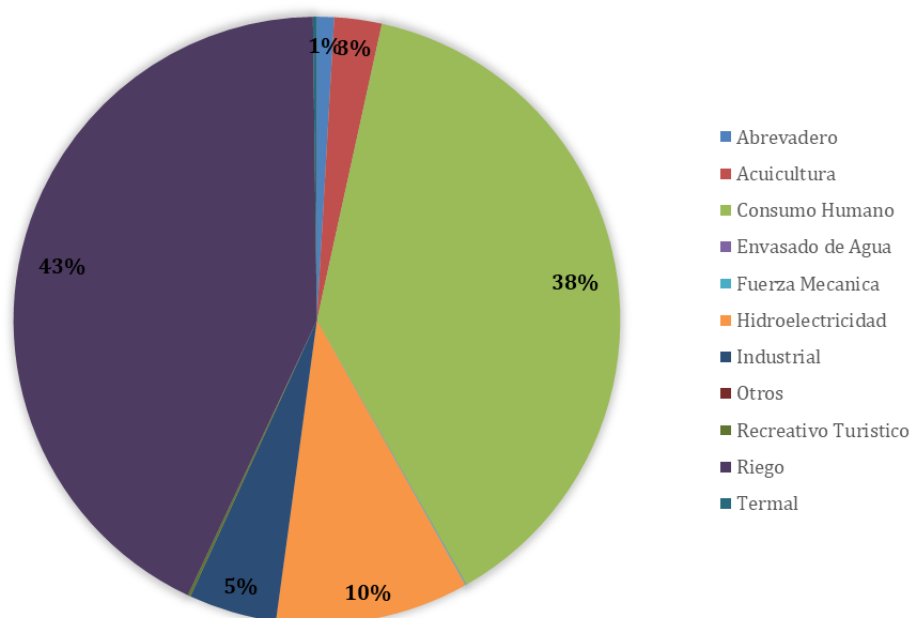


Figura 6. Distribución de los caudales de acuerdo con el uso y consumo de aguas subterráneas

Según la Figura 7, la hidroelectricidad es el uso dominante del agua subterránea en la región Amazónica, representando el 72% del caudal total registrado, una cifra poco convencional si se compara con otros contextos, pero que podría estar asociada a sistemas hidroeléctricos locales o pequeñas plantas que aprovechan descargas subterráneas de forma directa. Le siguen el consumo humano con un 12%, y la acuicultura, que representa un 10% del caudal, destacando su importancia en ecosistemas húmedos donde esta actividad se apoya en fuentes subterráneas estables. Los usos industriales (4%) y riego (1%) tienen una participación menor. Este perfil mixto pone de relieve que, a pesar de la vasta disponibilidad de agua superficial en la Amazonía, el recurso subterráneo cumple un rol estratégico en usos energéticos

y poblacionales específicos, por lo que se requiere integrar estos datos en los planes regionales de ordenamiento y conservación hidrogeológica.

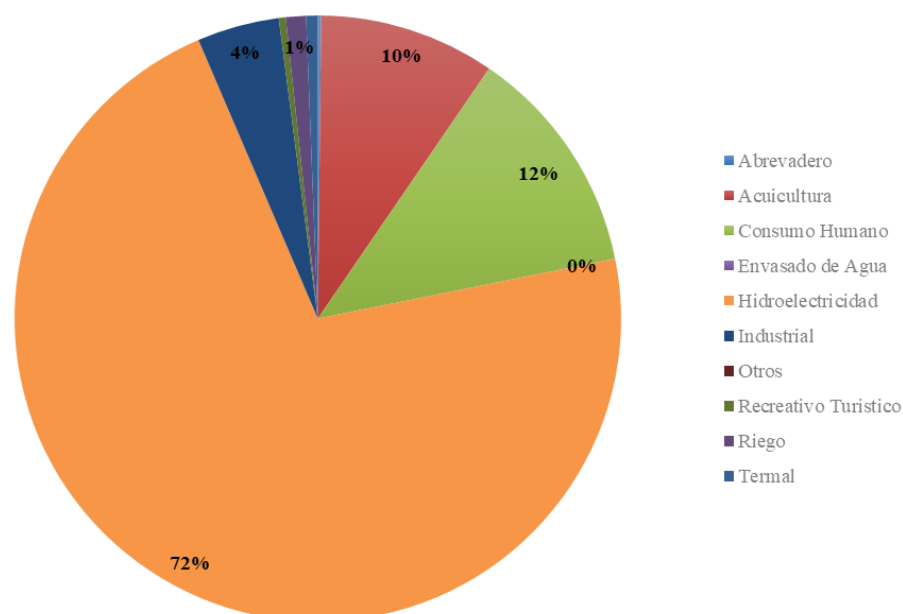


Figura 7 Distribución de los caudales de acuerdo con el uso y consumo de aguas subterráneas en la región Amazónica

Tal como se muestra en la Figura 8, la región Costa evidencia una marcada concentración del caudal de aguas subterráneas en el uso agrícola (riego), que representa el 79% del total extraído. Este valor confirma el rol crítico del recurso subterráneo en la sostenibilidad del sistema agroproductivo costero, especialmente en zonas con alta estacionalidad de precipitaciones o con escasez de fuentes superficiales permanentes. En segundo lugar aparece el uso industrial, con un 12%, seguido por el consumo humano, que representa el 7% del caudal. La acuicultura aparece con un 2%, y otros usos como abrevaderos, envasado tienen presencia marginal o nula. Este patrón revela una alta presión hídrica sobre los acuíferos, principalmente desde el sector agrícola tecnificado, lo cual exige estrategias de

manejo basadas en monitoreo de niveles freáticos, recarga artificial y prevención de intrusión salina, particularmente en zonas costeras con acuíferos no confinados.

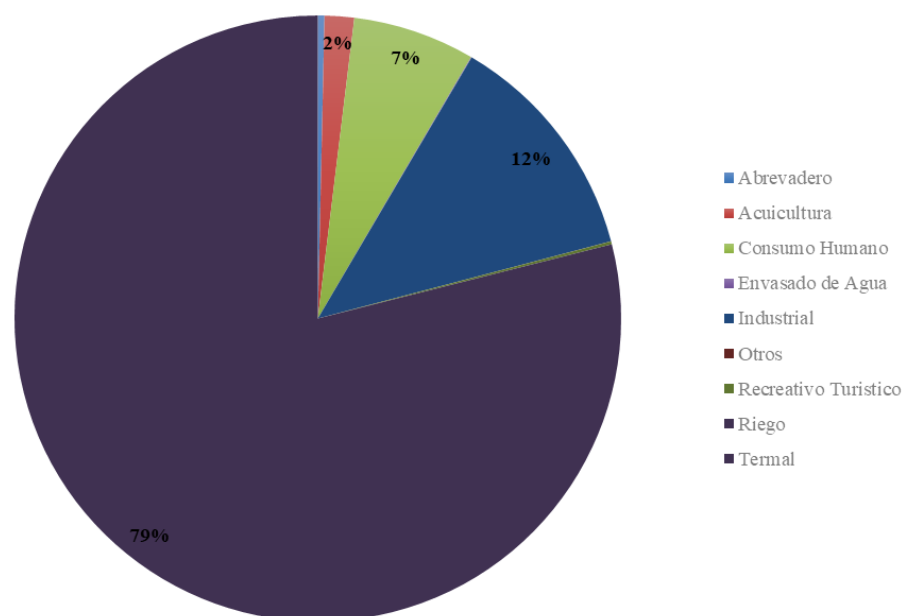


Figura 8 Distribución de los caudales de acuerdo con el uso y consumo de aguas subterráneas en la región Costa

La Figura 9 muestra que el consumo humano representa el 58% del caudal en la región Sierra, confirmando su papel clave en el abastecimiento poblacional, especialmente en zonas rurales y de altura. Le sigue el riego con un 38%, reflejando la importancia del agua subterránea en actividades agrícolas de los valles interandinos. Usos como el industrial, abrevadero y acuicultura no superan el 2% cada uno, mientras que otros usos son prácticamente nulos. Este patrón evidencia un uso mayormente doméstico del recurso, que requiere medidas de protección de fuentes y planificación del uso del suelo en zonas de recarga.

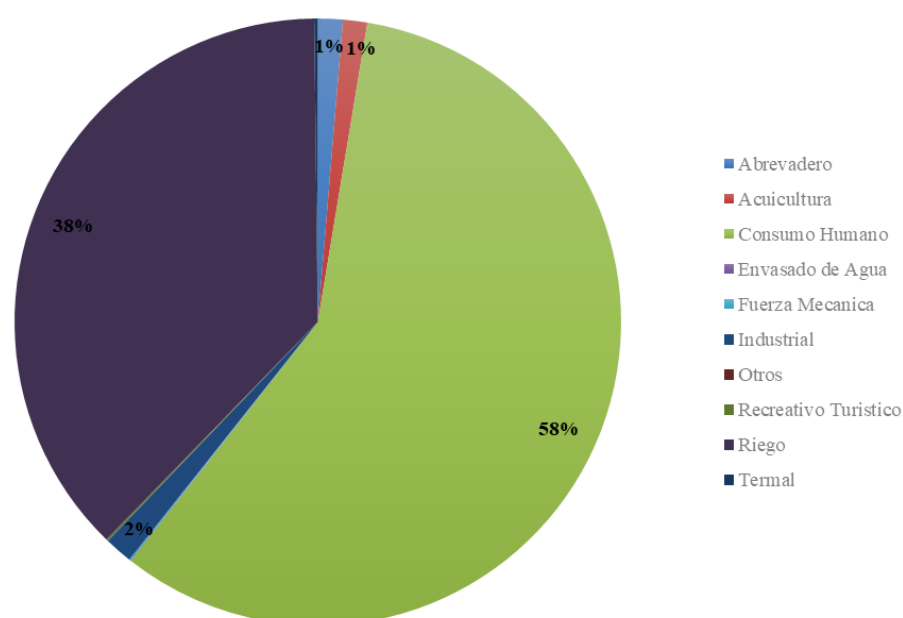


Figura 9 Distribución de los caudales de acuerdo con el uso y consumo de aguas subterráneas en la región Sierra

La Figura 10 presenta la distribución de caudales extraídos desde vertientes de origen subterráneo en el Ecuador, clasificadas por rangos de caudal e identificadas por región geográfica. Se destaca una fuerte concentración en la región Sierra, especialmente a lo largo del eje andino, donde las condiciones geológicas —como la presencia de acuíferos fisurados o semiconfinados— propician la emergencia natural del agua subterránea hacia la superficie, formando vertientes o manantiales.

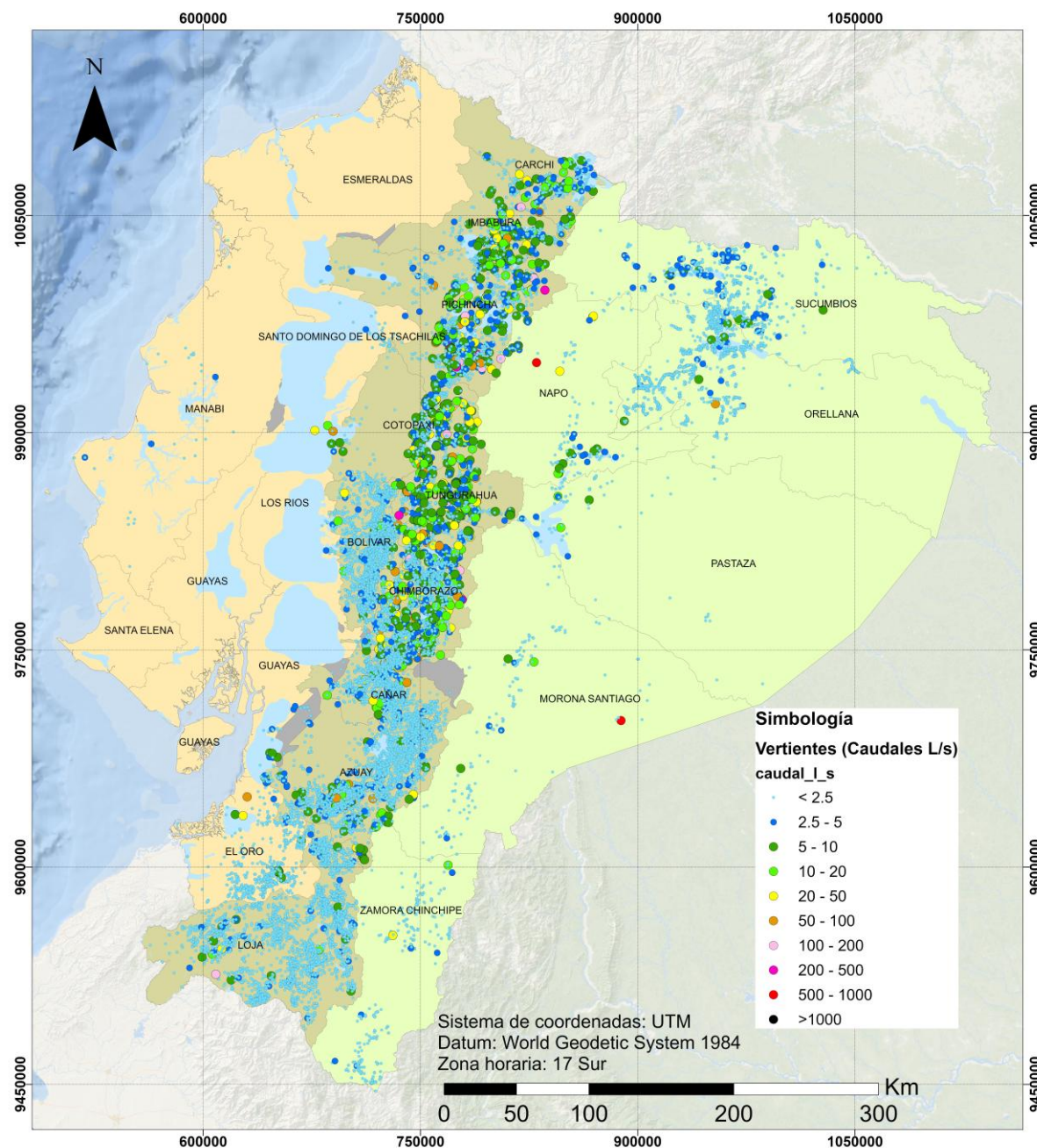


Figura 10. Mapa de distribución de extracción de agua por vertientes

Según los datos representados, la mayoría de estas vertientes presentan caudales menores a 2,5 L/s, lo cual indica que muchas de ellas cumplen funciones de abastecimiento básico en comunidades rurales o centros poblados pequeños. No obstante, también se

identifican casos con caudales superiores a 100 L/s, lo cual sugiere la existencia de descargas naturales importantes desde acuíferos altamente productivos o presurizados. Por ello, el mapa de la Figura 10 constituye un insumo crítico para diseñar estrategias de conservación de zonas de recarga, implementar medidas de protección sanitaria, y establecer límites de intervención en los acuíferos vinculados.

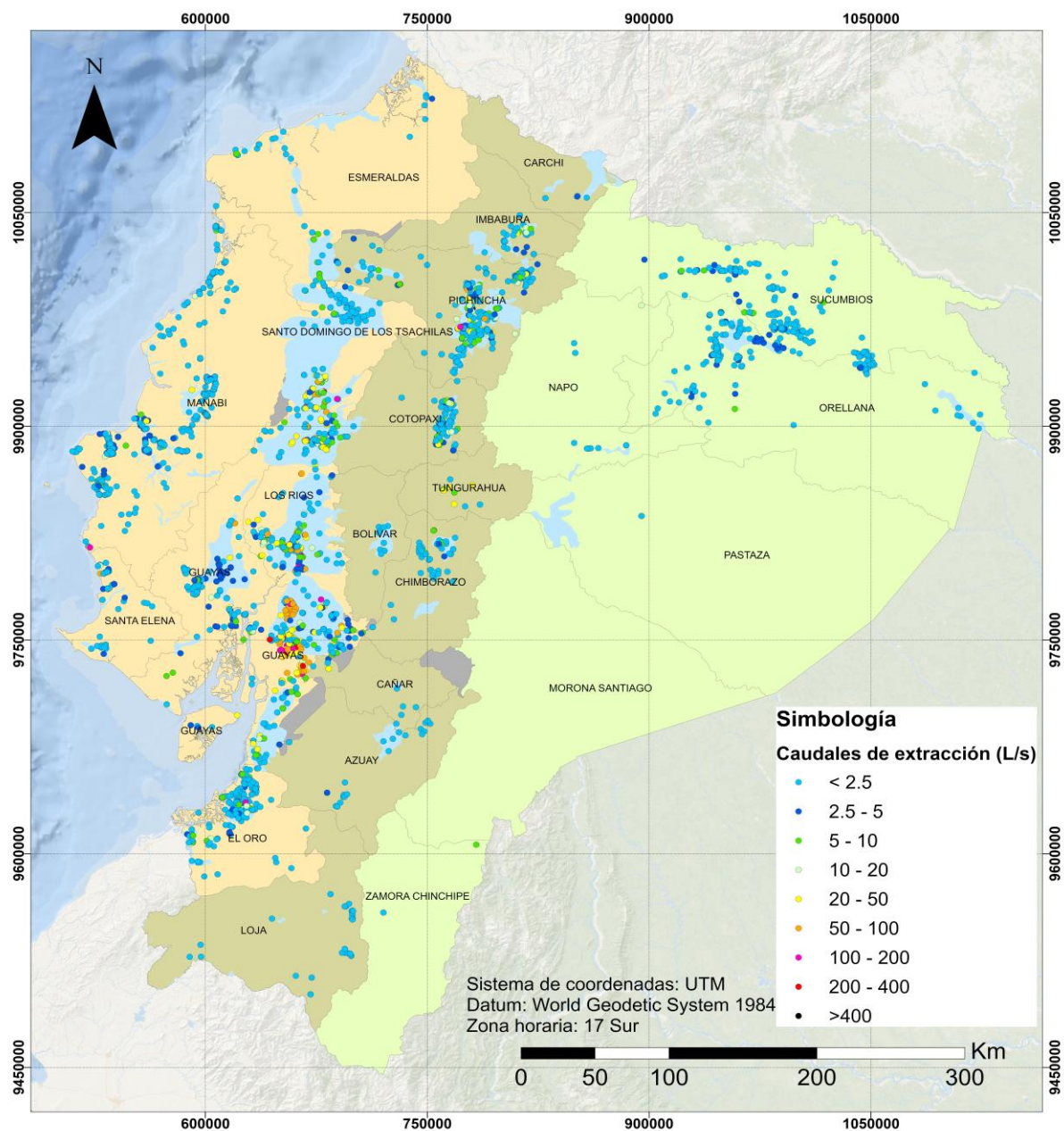


Figura 11. Mapa de distribución de extracción de agua por pozos

Por su parte, la Figura 11 presenta la ubicación de los pozos de extracción de aguas subterráneas y sus respectivos caudales, también segmentados por rangos e identificados por región. A diferencia de las vertientes, los pozos representan captaciones inducidas directamente por intervención humana, con una notable densidad en la Sierra y presencia significativa en la Costa. Aunque la mayoría registra caudales bajos ($<2,5$ L/s), se destacan puntos con extracciones superiores a 100 o incluso 400 L/s, lo que evidencia una presión considerable sobre determinados acuíferos, especialmente en zonas agrícolas o urbanas.

Desde una perspectiva técnica, esta concentración de pozos profundos en áreas densamente pobladas —como Quito, Cuenca o Machala— plantea riesgos asociados a la sobreexplotación, descenso del nivel freático y potencial intrusión salina en acuíferos costeros. Además, su proximidad a fuentes de contaminación antrópica aumenta la vulnerabilidad de estos sistemas, especialmente cuando las zonas de recarga no cuentan con medidas de protección efectivas.

Además del análisis espacial presentado en las Figuras 10 y 11, es relevante incorporar la representatividad numérica y volumétrica de las fuentes de captación subterránea a nivel nacional. Este análisis permite complementar la lectura cartográfica con evidencia cuantitativa que describe la magnitud y la distribución del uso del recurso.

Tal como se observa en la Tabla 4, del total de captaciones de agua subterránea inventariadas, el 92% corresponde a vertientes de origen subterráneo, mientras que solo el 8% son pozos. Esta marcada predominancia de vertientes refleja la relevancia de los manantiales y surgencias naturales como fuentes primarias de abastecimiento, especialmente en zonas rurales y de difícil acceso. Su distribución está asociada a zonas de descarga natural de los acuíferos, muchas de ellas en regiones de montaña.

Tabla 4. Representatividad de fuentes de agua subterránea por tipo de captación

| Tipo de Fuente | Número de captaciones | Proporción (%) |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------|
| Pozo | 3,432 | 8% |
| Vertiente | 41,044 | 92% |

En términos de caudal, los datos también muestran un comportamiento desigual. Como se indica en la Tabla 5, los caudales totales registrados desde vertientes alcanzan aproximadamente 59.292,90 l/s, mientras que los provenientes de pozos suman cerca de 26.686,86 l/s. Si bien las vertientes siguen siendo la fuente dominante en términos de caudal disponible, el aporte de los pozos resulta proporcionalmente mayor al número que representan.

Es importante señalar que estos valores de caudal no equivalen directamente a volúmenes de agua extraída sin contar con un período de operación definido (por ejemplo, diario o anual). En este análisis se asume —como criterio comparativo— que las condiciones de uso son similares entre fuentes, lo que permite identificar tendencias relativas sobre la intensidad de aprovechamiento del recurso. Esto sugiere que los pozos, aunque menos numerosos, se destinan a usos que requieren una mayor intensidad de extracción, como actividades agrícolas tecnificadas, procesos industriales o sistemas urbanos de abastecimiento.

Tabla 5. Caudales de extracción de aguas subterráneas por tipo de fuente

| Tipo de fuente | Caudal (l/s) | Proporción (%) |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| Pozo | 26,686.86 | 31% |
| Vertiente | 59,292.90 | 69% |

Este análisis confirma que el tipo de fuente condiciona no solo la forma de uso del recurso, sino también su impacto potencial sobre el acuífero. Las vertientes, al ser descargas naturales, están directamente conectadas a los sistemas hidrogeológicos y dependen críticamente de las condiciones de recarga. En cambio, los pozos, al intervenir de forma directa sobre el cuerpo acuífero, deben ser gestionados bajo criterios técnicos rigurosos que incluyan monitoreo de niveles, control de caudales y regulación del número de captaciones permitidas.

Por tanto, tanto los datos espaciales como los volumétricos deben ser considerados de forma complementaria para diseñar estrategias de gestión integrada, diferenciadas por tipo de fuente, nivel de presión y vulnerabilidad hidrogeológica.

En resumen, el análisis espacial y cuantitativo del uso de aguas subterráneas en el Ecuador ha permitido identificar patrones de distribución, intensidad de uso y presión sobre los acuíferos. Si bien las vertientes representan la mayor cantidad de captaciones registradas, es importante señalar que su existencia no implica necesariamente un uso activo. En cambio, los pozos, al ser construidos para extracción, reflejan de forma más directa la presión sobre el recurso. Esto evidencia la necesidad de estrategias de gestión diferenciadas según el tipo de fuente.

La interpretación conjunta de los mapas y datos estadísticos evidencia la existencia de zonas críticas que requieren atención prioritaria, tanto desde el enfoque de conservación como de regulación del uso del recurso. Estos hallazgos ofrecen una base técnica sólida para formular propuestas de planificación hídrica adaptadas al contexto hidrogeológico nacional. En este sentido, los resultados aquí expuestos constituyen un insumo clave para la elaboración de lineamientos de política y acciones de manejo sostenible del agua subterránea, los cuales serán abordados en las conclusiones del presente trabajo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis bibliográfico y documental sistemático permitió responder la pregunta de investigación planteada: ¿Cuál es el estado actual del conocimiento sobre las aguas subterráneas, su distribución y los usos del agua en el Ecuador? El conocimiento hidrogeológico del Ecuador se encuentra en un estado de desarrollo heterogéneo y fragmentado, tanto en términos espaciales como temporales. A pesar de la existencia de esfuerzos relevantes impulsados por entidades como el INAMHI, universidades e institutos técnicos, no se dispone aún de una infraestructura institucional consolidada ni de una red nacional de monitoreo que permita evaluar en tiempo real el estado cuantitativo y cualitativo de los acuíferos.

Se identificó que gran parte de los estudios hidrogeológicos disponibles se concentran en zonas puntuales de interés económico o urbano, mientras que extensas áreas rurales y amazónicas continúan subrepresentadas en el conocimiento técnico. Asimismo, las bases de datos consultadas —aunque valiosas— presentan vacíos de consistencia, actualización y compatibilidad cartográfica, lo que limita su aprovechamiento para análisis predictivos y modelación hidrogeológica avanzada.

El análisis geoespacial de las captaciones registradas en el inventario nacional permitió cumplir el primer objetivo enfocado en i) sistematizar información secundaria relevante sobre estudios hidrogeológicos en el país; el análisis revela una distribución altamente concentrada en la región Sierra (80% de los puntos), donde las condiciones geológicas —particularmente la presencia de acuíferos fisurados y someros en valles interandinos— han favorecido históricamente la proliferación de captaciones, especialmente vertientes de descarga natural. La Costa y la Amazonía, con el 9% y 11% respectivamente, presentan densidades de captación menores, lo que no necesariamente refleja una menor dependencia, sino una probable sub-notificación institucional o infraestructura informal de uso del recurso.

Desde el punto de vista volumétrico, el caudal total extraído es liderado por la Sierra (60,2%), seguido por la Costa (25,4%), donde se registran captaciones más intensivas, especialmente para fines agrícolas. Esta discrepancia entre número de captaciones y volumen extraído evidencia diferentes estrategias de uso del recurso, y sugiere patrones de gestión no homogéneos que deben ser considerados en la planificación territorial.

El análisis por tipo de fuente permitió cumplir el objetivo ii) de analizar geoespacialmente las captaciones de agua subterránea en el registro nacional, demostrando que el 92% de las captaciones corresponden a vertientes de origen subterráneo, mientras que los pozos representan solo el 8%, aunque aportan el 31% del caudal total. Esta relación confirma que las vertientes —como formas de descarga natural del acuífero— son ampliamente utilizadas para abastecimiento rural y comunitario, aunque su caudal unitario es generalmente bajo. Por el contrario, los pozos —mayoritariamente concentrados en zonas urbanas y agrícolas de alta demanda— ejercen una presión más intensa sobre el sistema acuífero.

Este hallazgo pone en evidencia la necesidad de un enfoque de gestión diferenciado por tipo de fuente, que reconozca las dinámicas hidrogeológicas locales y los riesgos específicos asociados: descenso piezométrico, contaminación difusa, reducción de caudal en vertientes, o intrusión salina en zonas costeras.

Las cartografías elaboradas en esta investigación, permitieron cumplir el objetivo iii) enfocado en proveer de recomendaciones integrales en función de las cartografías generadas para la toma de decisiones. Esta cartografía fue basada en insumos actualizados, validados y georreferenciados y representan un avance sustancial respecto a los registros disponibles en décadas pasadas. Al integrar variables como tipo de captación, caudal, intensidad de uso y localización, se logra una visualización integrada del sistema hidrogeológico explotado en el país.

Estas herramientas permiten identificar con precisión zonas críticas, áreas de alta densidad de captación, regiones con baja cobertura de monitoreo y posibles conflictos de uso. En consecuencia, las figuras presentadas no solo cumplen un rol descriptivo, sino que se constituyen en instrumentos para la toma de decisiones técnicas y de política pública.

En cuanto a las recomendaciones, primero, es necesario desarrollar planes de gestión hídrica con enfoque territorial diferenciados, sustentados en los patrones espaciales y funcionales evidenciados por la cartografía generada. Las marcadas diferencias en la densidad de captaciones, tipo de fuente y volumen extraído por región evidencian la necesidad de establecer zonas prioritarias de intervención. En aquellas regiones con alta densidad de pozos y caudales significativos, deberán implementarse esquemas de regulación y monitoreo técnico intensivo. En contraste, en zonas con predominancia de vertientes naturales se requiere priorizar la conservación de zonas de recarga, la protección de fuentes y la planificación del uso del suelo en función de la dinámica hidrogeológica. Asimismo, se identifican áreas subrepresentadas en los registros oficiales que demandan validación técnica y mayor inversión en estudios hidrogeológicos detallados. Estos insumos deben integrarse obligatoriamente en los instrumentos de ordenamiento territorial y planificación sectorial.

En segundo lugar, se propone consolidar las capacidades institucionales para la gestión del agua subterránea, particularmente mediante la implementación de una infraestructura nacional de monitoreo liderada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Esta infraestructura deberá permitir el seguimiento periódico de niveles piezométricos, caudales de extracción y parámetros de calidad del agua, especialmente en zonas de alta presión hídrica. Adicionalmente, se recomienda establecer una base de datos georreferenciada, interoperable y de libre acceso, que integre información técnica, administrativa y legal, articulando esfuerzos entre GAD, universidades, centros de

investigación e instituciones rectoras del agua. Esta acción permitirá superar los vacíos identificados en la sistematización de la información existente y garantizará una toma de decisiones sustentada en evidencia confiable y actualizada.

Finalmente, se recomienda utilizar la cartografía elaborada en esta tesis como herramienta estratégica para orientar estudios prospectivos y procesos de gestión preventiva. Las figuras generadas permiten identificar zonas críticas de extracción y visualizar desequilibrios entre número de captaciones y caudal explotado. Si bien estos insumos pueden apoyar futuras modelaciones del comportamiento del acuífero, se requiere información hidrogeoquímica y monitoreo directo del sistema para estimar volúmenes almacenados y la dinámica real de recarga y extracción. En consecuencia, estas cartografías deben ser utilizadas como insumo base para el desarrollo de modelaciones hidrogeológicas regionales, simulación de escenarios de cambio climático, evaluación de riesgo de intrusión salina o pérdida de vertientes, y para la formulación de políticas públicas de seguridad hídrica, recarga artificial y adaptación territorial. Al transferir este conocimiento técnico al aparato institucional y a los procesos de ordenamiento territorial, se fortalece una gobernanza del agua subterránea basada en criterios científicos, preventivos y de largo plazo.

REFERENCIAS

- Benavides-Muñoz, H. M., Correa-Escudero, V., Pucha-Cofrep, D., & Pucha-Cofrep, F. (2024). Analysis of Land Use Change and Hydrogeological Parameters in the Andean Semiarid Region of Ecuador. *Water (Switzerland)*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/w16060892>
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2015). *INTRODUCCIÓN A LA HIDROGEOLOGÍA DEL ECUADOR* (Vol. 11, Issue 1). http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETU_NGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Camacho, C., & Cuesta, G. (2021). Análisis hidrogeológico de los estratos someros de la Joya de los Sachas mediante condiciones de perforación en secciones de pozos verticales. *Dominio de Las Ciencias*, 7, 1044–1054. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8385876>
- Carrión-Mero, P., 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 (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/w13040537>
- ESPOL-TECH E.P, CIPAT, & SENAGUA. (2014). *Proceso : Re-Senagua-026-2012 Proyecto : Elaboración Del Mapa Hidrogeológico a Escala 1 : 250 . 000 Informe Final*. 110–121. [file:///C:/Users/Wimdowns 10/Downloads/4_MAPA HIDROGEOLOGICO ESPOL.pdf](file:///C:/Users/Wimdowns%2010/Downloads/4_MAPA_HIDROGEOLOGICO_ESPOL.pdf)
- Gualli, A., Galvão, P., Buenaño, M., & Conicelli, B. (2023). Estimating groundwater recharge and precipitation sources of the Zamora River Basin, southeastern Ecuador, using GIS and

- stable isotopes. *Environmental Earth Sciences*, 82(17). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11097-6>
- 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>
- Herrera-Franco, G., Morante-Carballo, F., Bravo-Montero, Lady, Valencia-Robles, J., Aguilar-Aguilar, M., Martos-Rosillo, S., & Carrión-Mero, P. (2024). Water Sowing and Harvesting (WS&H) for Sustainable Management in Ecuador: A Review. *Heritage*, 7(7), 3696–3718. <https://doi.org/10.3390/heritage7070175>
- IIGE. (2022). *Estado del arte de las aguas subterráneas y de la cartografía hidrogeológica en Ecuador Contenido :*
- Kinoti, I., Leblanc, M., Lekula, M., Tweed, S., Kenabatho, P. K., Oliosio, A., & Lubczynski, M. W. (2024). Hydrogeological conceptual model of Stampriet transboundary aquifer system in Southern Africa. *Groundwater for Sustainable Development*, 26(July), 101301. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101301>
- Olivier, K. K. J., Jules, M. O. M., Bérenger, K., Dimitri, S. D., Brou, D., & Lazare, K. K. (2024). Identification of hydrogeological and geoelectrical parameters influencing the productivity of boreholes in the commune of Daloa (Central-Western of Côte d'Ivoire). *Heliyon*, 10(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29468>
- Zeydalinejad, N., Javadi, A. A., Baldock, D., & Webber, J. L. (2024). An integrated hydrological-hydrogeological model for analysing spatio-temporal probability of groundwater infiltration in urban infrastructure. *Sustainable Cities and Society*, 116(April), 105891. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105891>

LATINA, R. H. S. E. A. (2009). PROYECTO RLA/8/031 MANEJO INTEGRADO Y SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS EN AMÉRICA LATINA. *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006*, 1.

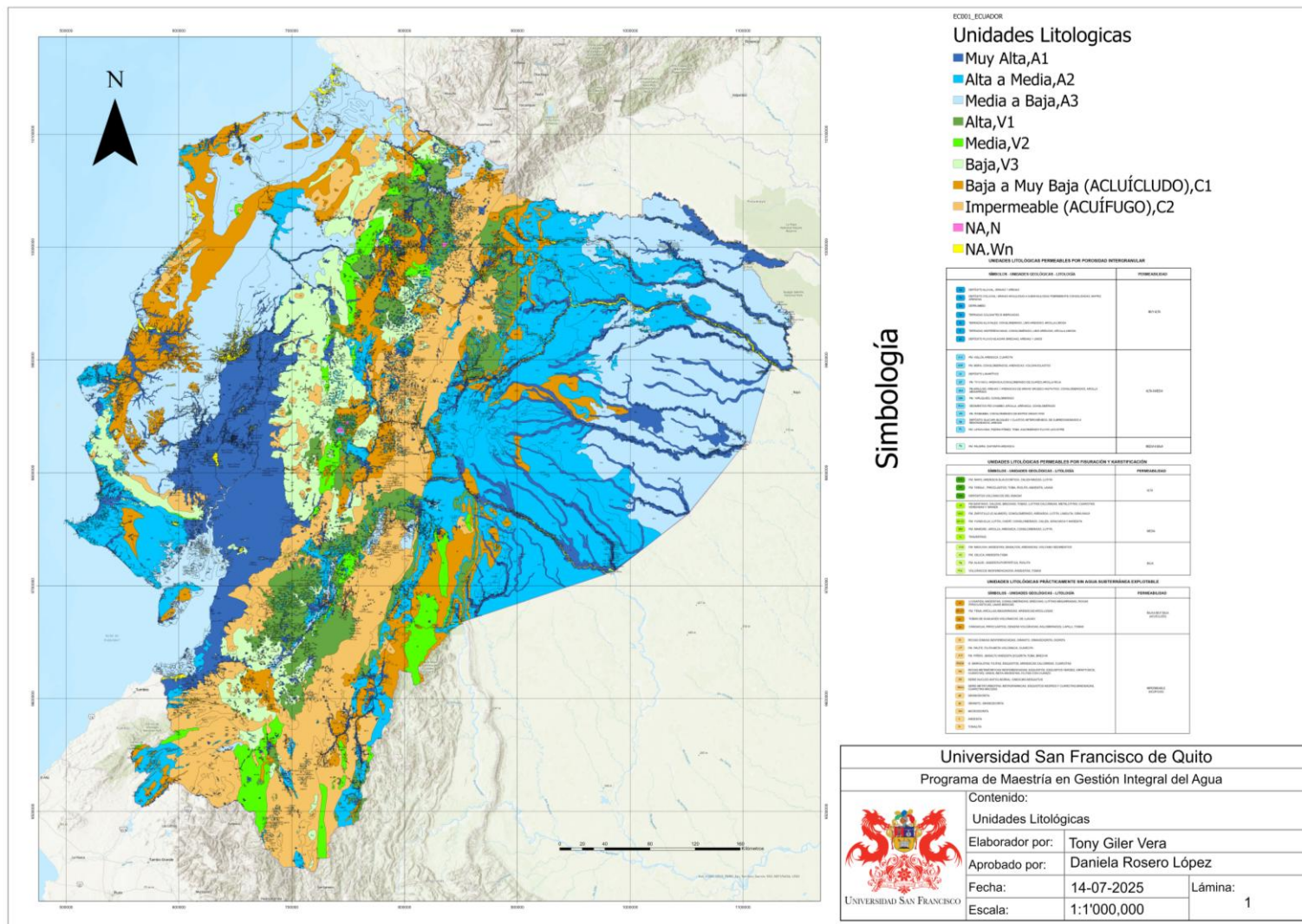
Neuman, W. (2005). *Social research methods: Quantitative and qualitative approaches* (6th ed.). Boston: Allyn & Bacon.

Polit, A.A. & González, B.B. (2011). Educación en Ecuador. En P. Pérez (Ed.), *La educación en el mundo* (pp.101-132). Barcelona, España: ExpoEditor.

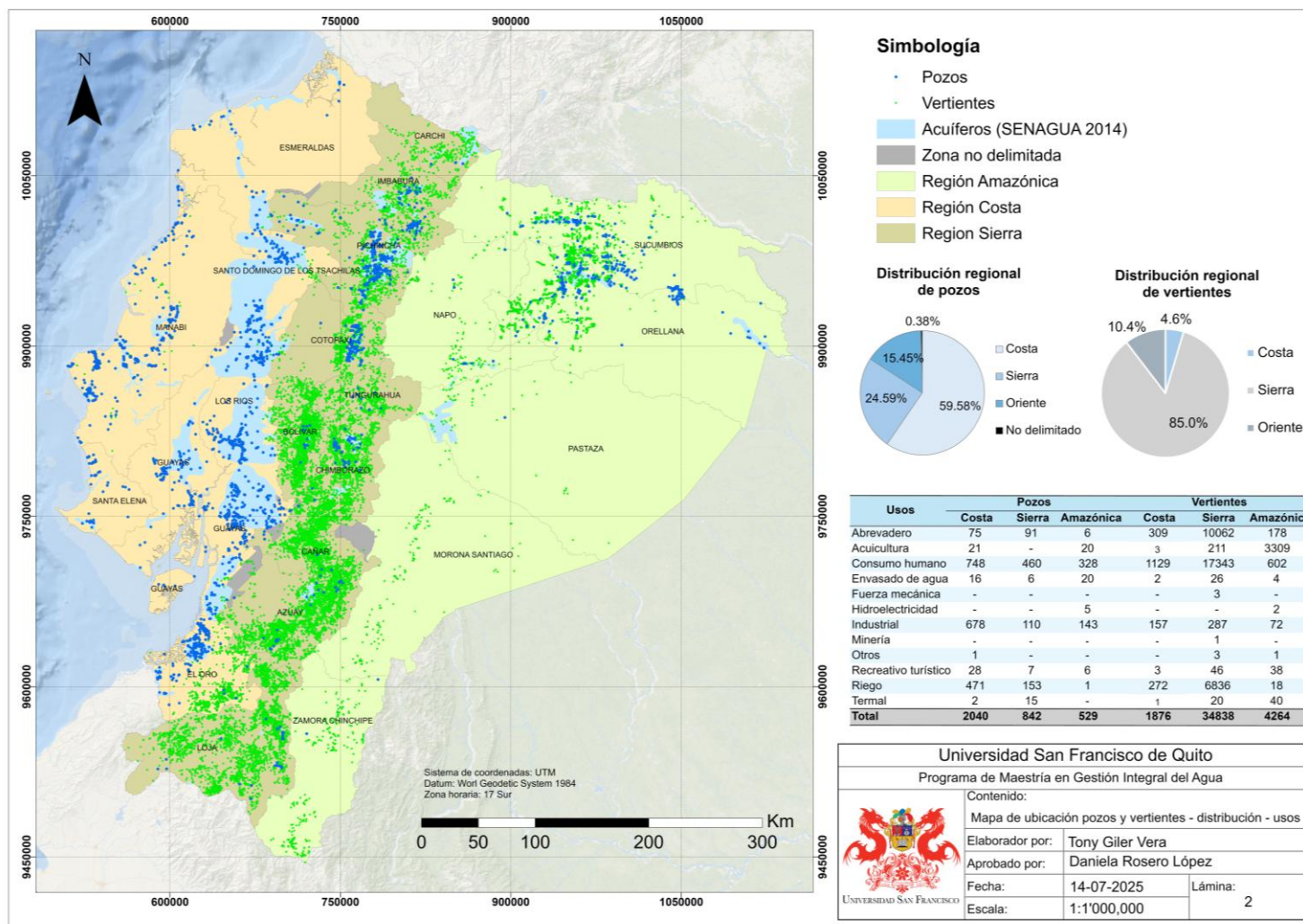
ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| ANEXO A: Unidades Litológicas | 53 |
| ANEXO B: Mapa de ubicación pozos y vertientes - distribución - usos | 54 |
| ANEXO C: Mapa de ubicación vertientes - caudales de extracción..... | 55 |
| ANEXO D: Mapa de ubicación pozos - caudales de extracción | 56 |
| ANEXO E: Mapa general de hidrogeología..... | 57 |
| ANEXO F: Mapa de hidrogeología zona 1 | 58 |
| ANEXO G: Mapa de hidrogeología zona 2 | 59 |
| ANEXO H: Mapa de hidrogeología zona 3 | 60 |
| ANEXO I: Mapa de hidrogeología zona 4..... | 61 |
| ANEXO J: Mapa de hidrogeología zona 5..... | 62 |
| ANEXO K: Mapa de hidrogeología zona 6 | 63 |
| ANEXO L: Mapa de hidrogeología zona 7 | 64 |
| ANEXO M: Mapa de hidrogeología zona 8..... | 65 |
| ANEXO N: Mapa de hidrogeología zona 9..... | 66 |
| ANEXO O: Mapa de hidrogeología zona 10 | 67 |
| ANEXO P: Mapa de hidrogeología zona 11 | 68 |
| ANEXO Q: Mapa de hidrogeología zona 12 | 69 |
| ANEXO R: Mapa de hidrogeología zona 13..... | 70 |
| ANEXO S: Mapa de hidrogeología zona 14 | 71 |
| ANEXO T: Mapa de hidrogeología zona 15 | 72 |
| ANEXO U: Mapa de hidrogeología zona 16..... | 73 |
| ANEXO V: Mapa de hidrogeología zona 17..... | 74 |
| ANEXO W: Mapa de hidrogeología zona 18..... | 75 |
| ANEXO X: Mapa de hidrogeología zona 19..... | 76 |
| ANEXO Y: Mapa de hidrogeología zona 20..... | 77 |

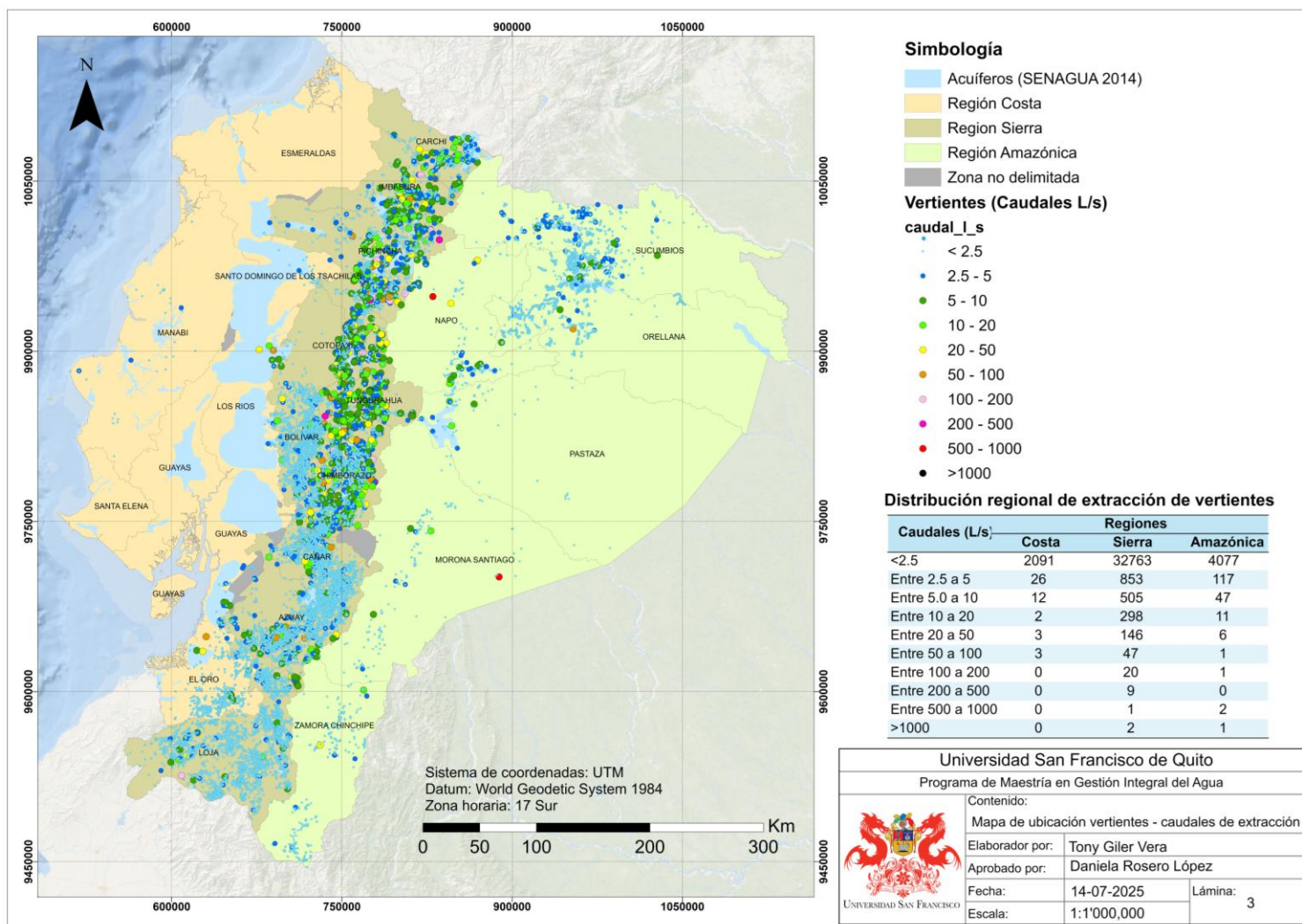
ANEXO A: Unidades Litológicas



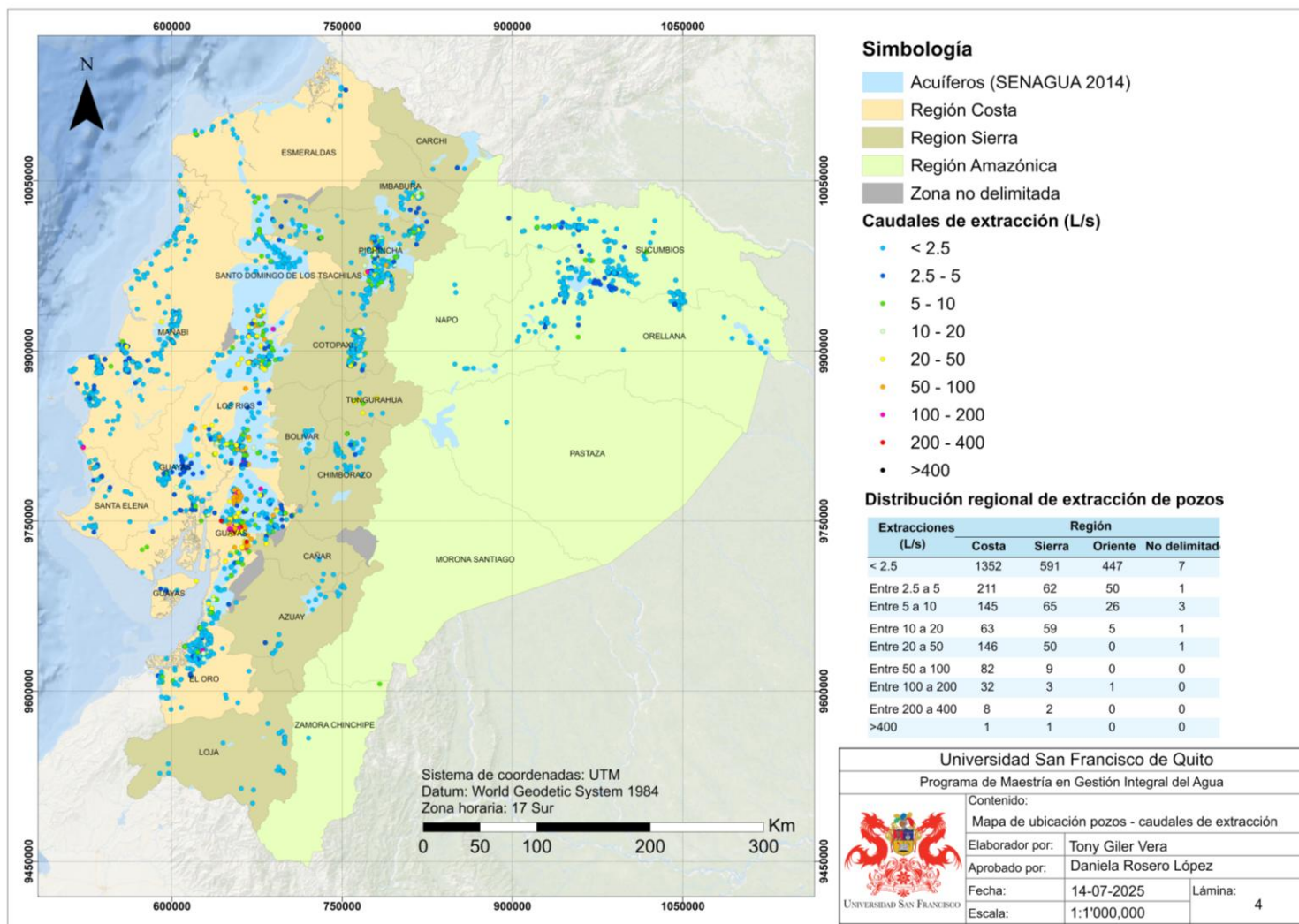
ANEXO B: Mapa de ubicación pozos y vertientes - distribución - usos



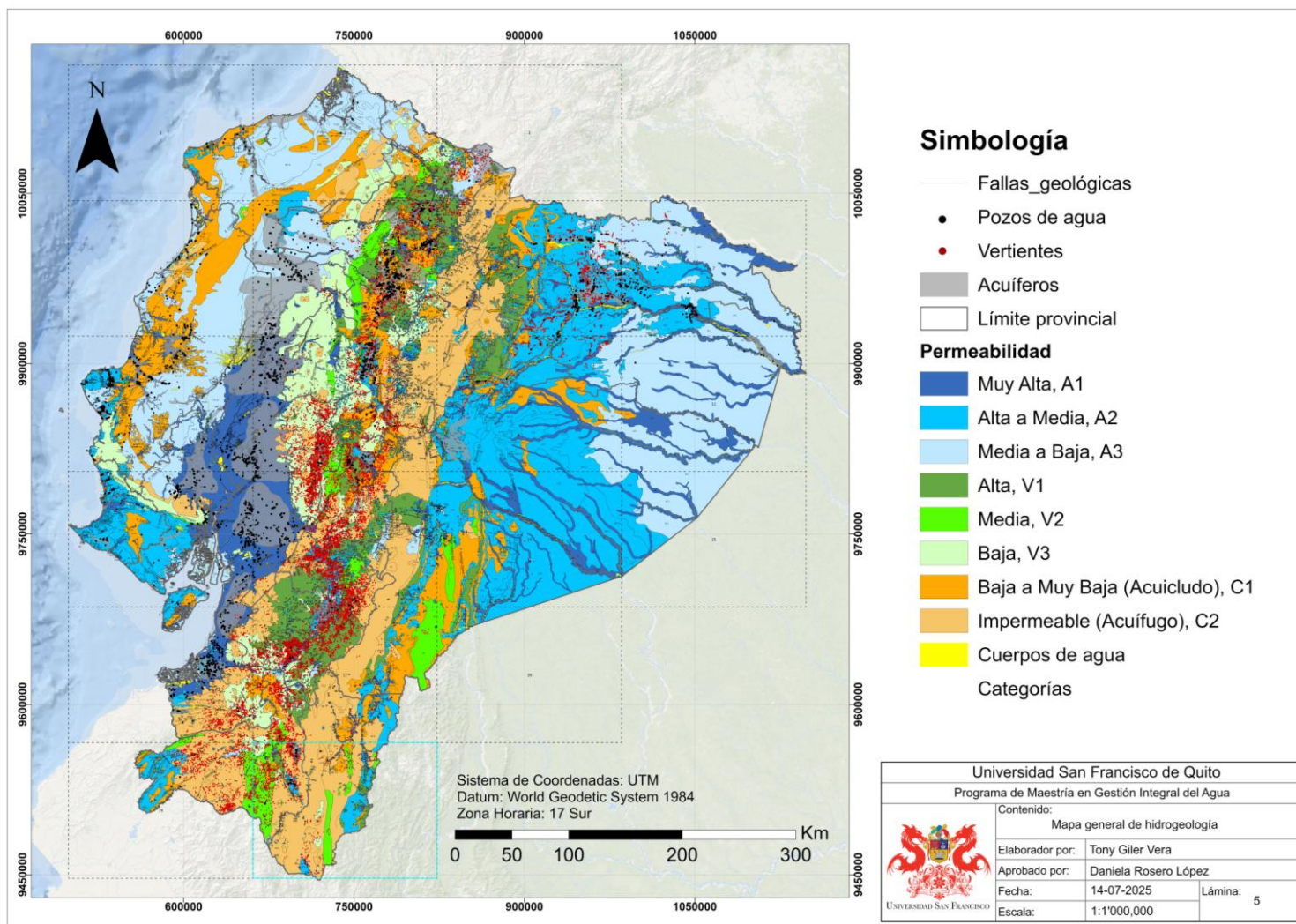
ANEXO C: Mapa de ubicación vertientes - caudales de extracción



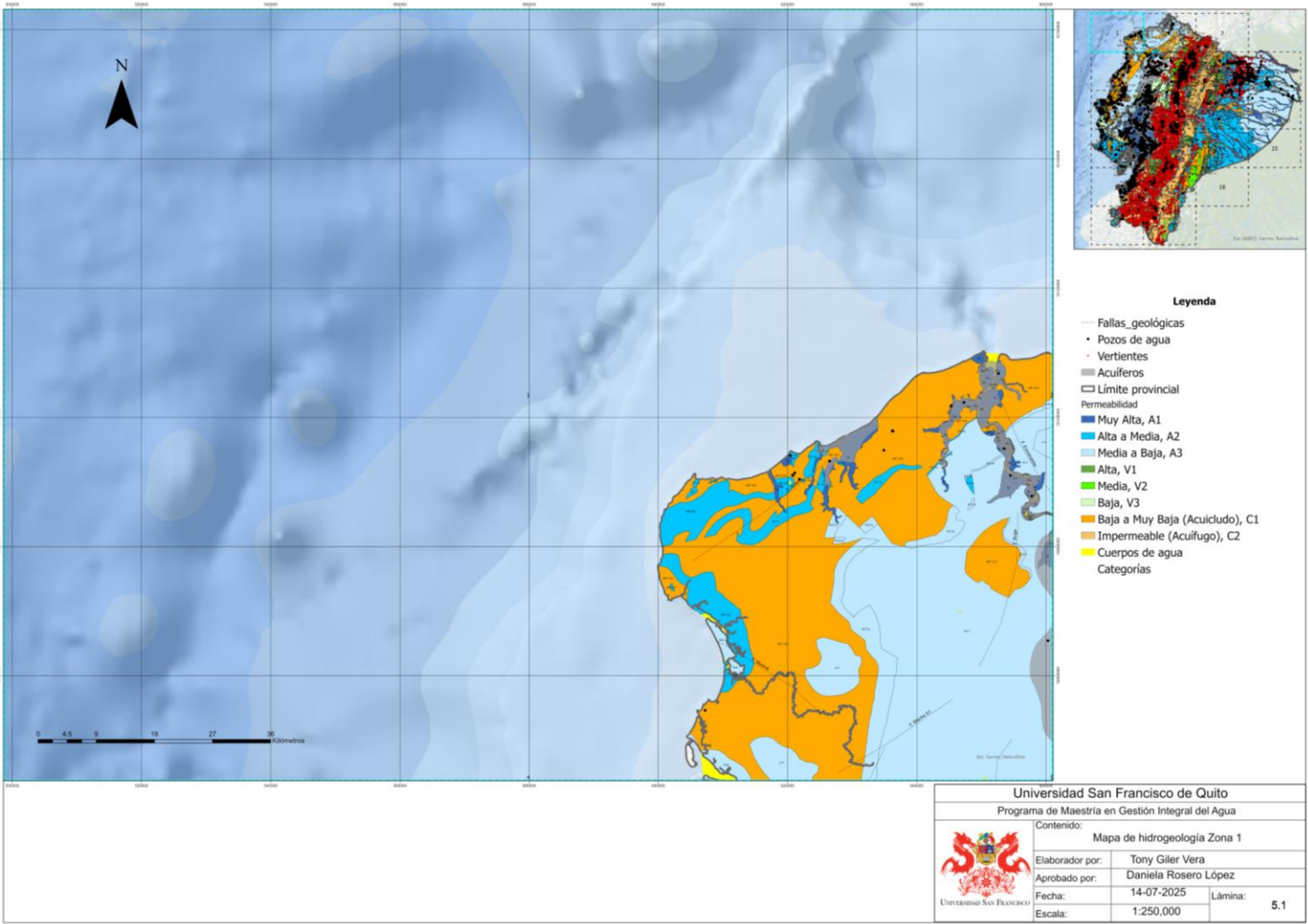
ANEXO D: Mapa de ubicación pozos - caudales de extracción



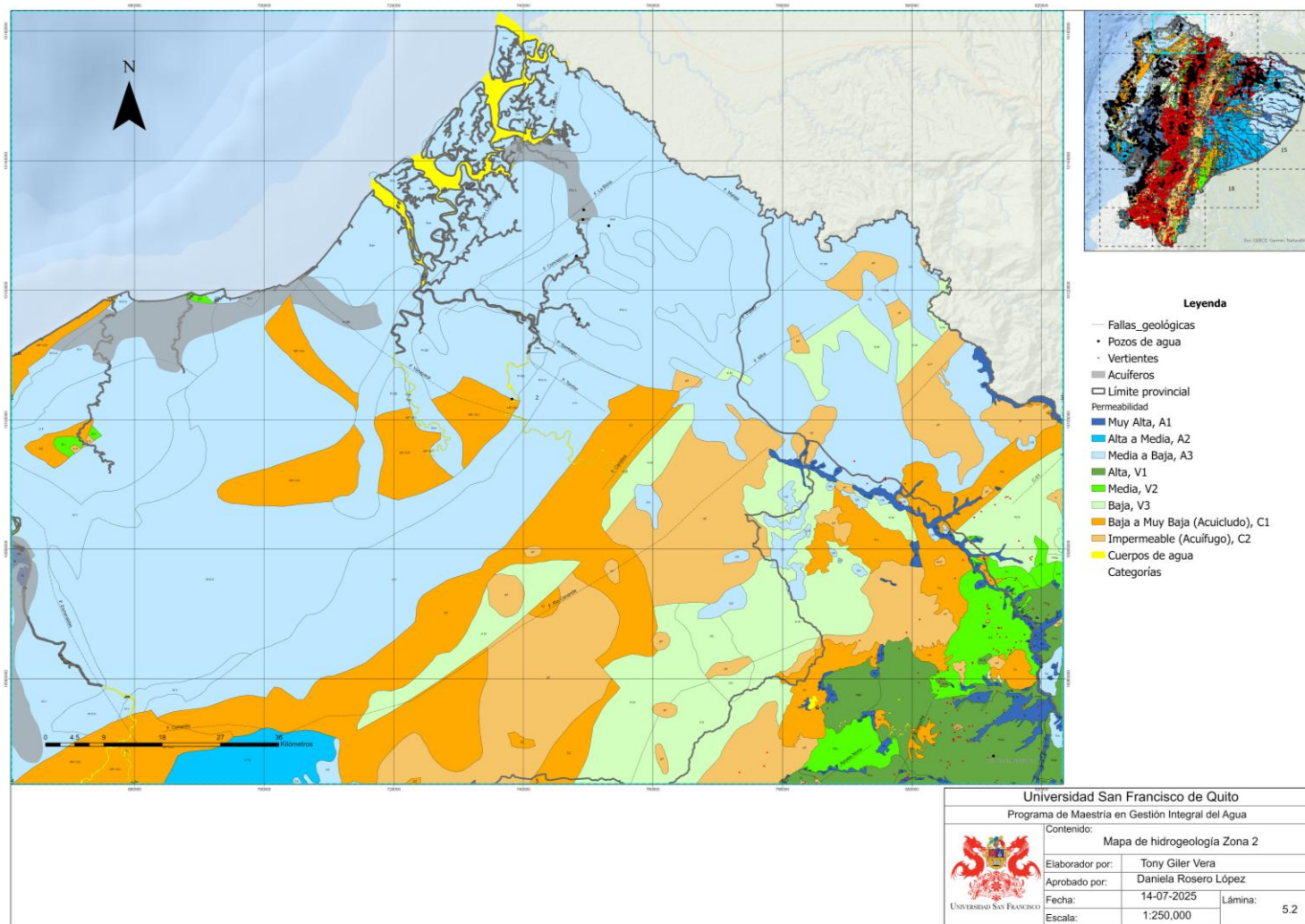
ANEXO E: Mapa general de hidrogeología



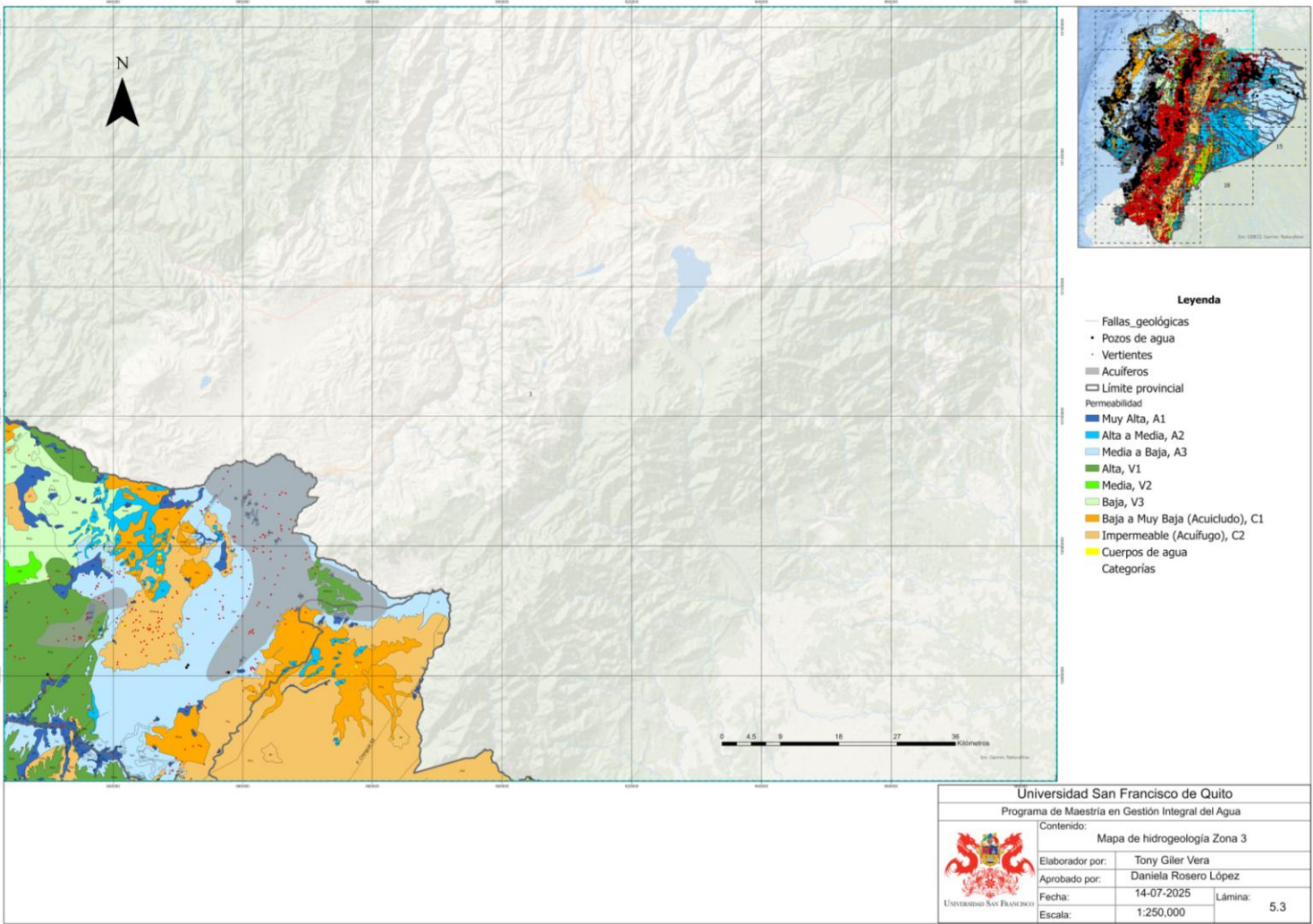
ANEXO F: Mapa de hidrogeología zona 1



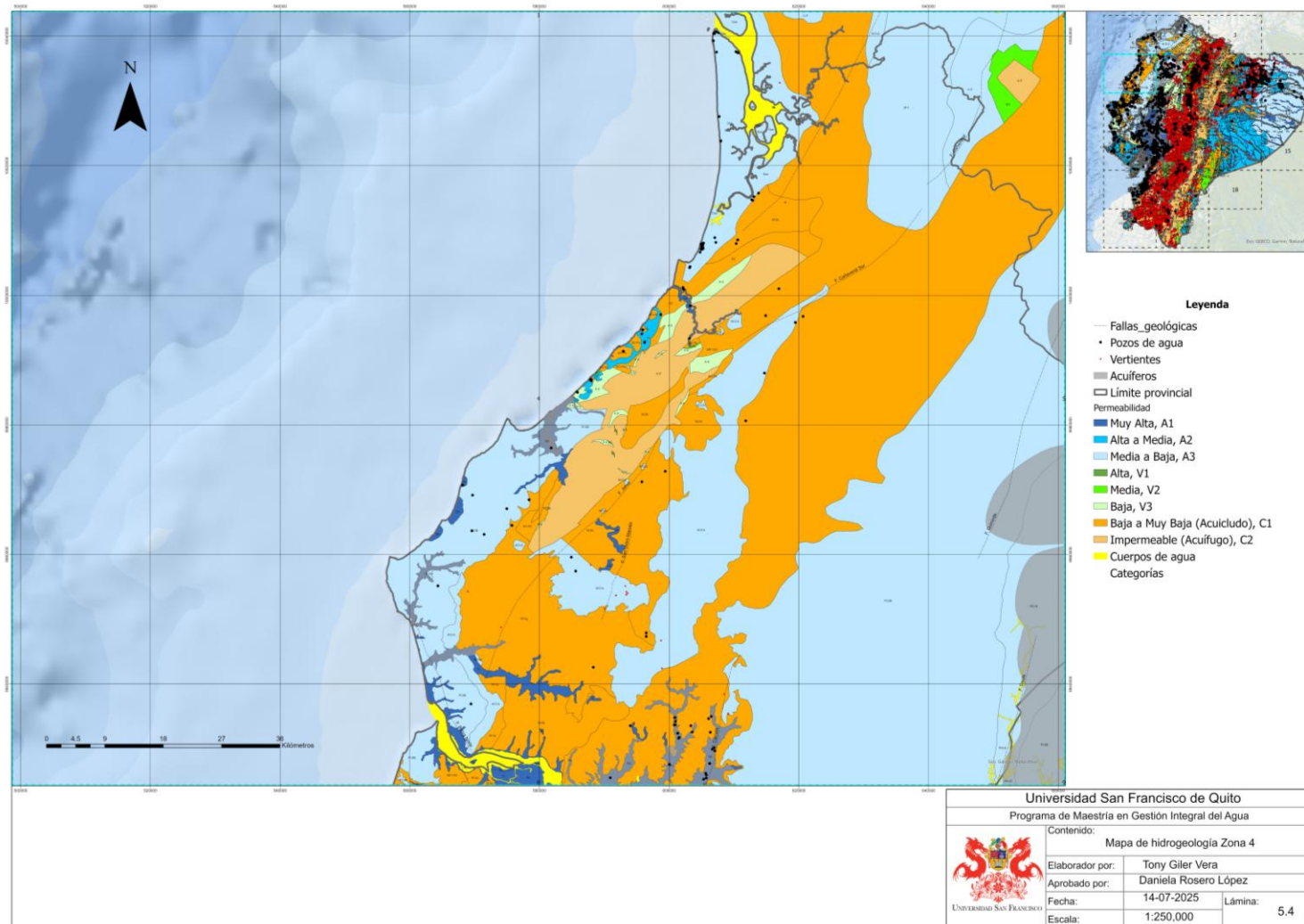
ANEXO G: Mapa de hidrogeología zona 2



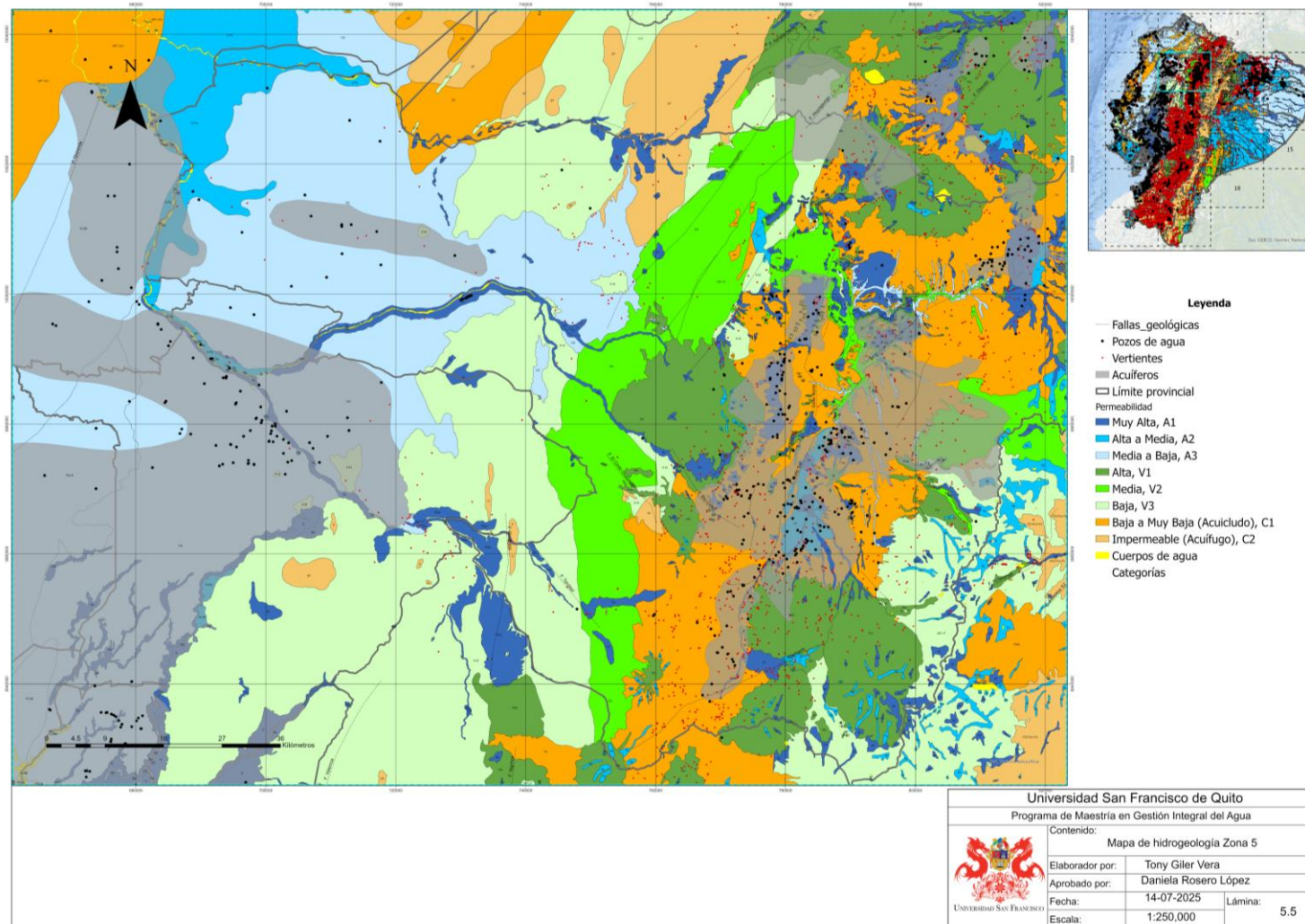
ANEXO H: Mapa de hidrogeología zona 3



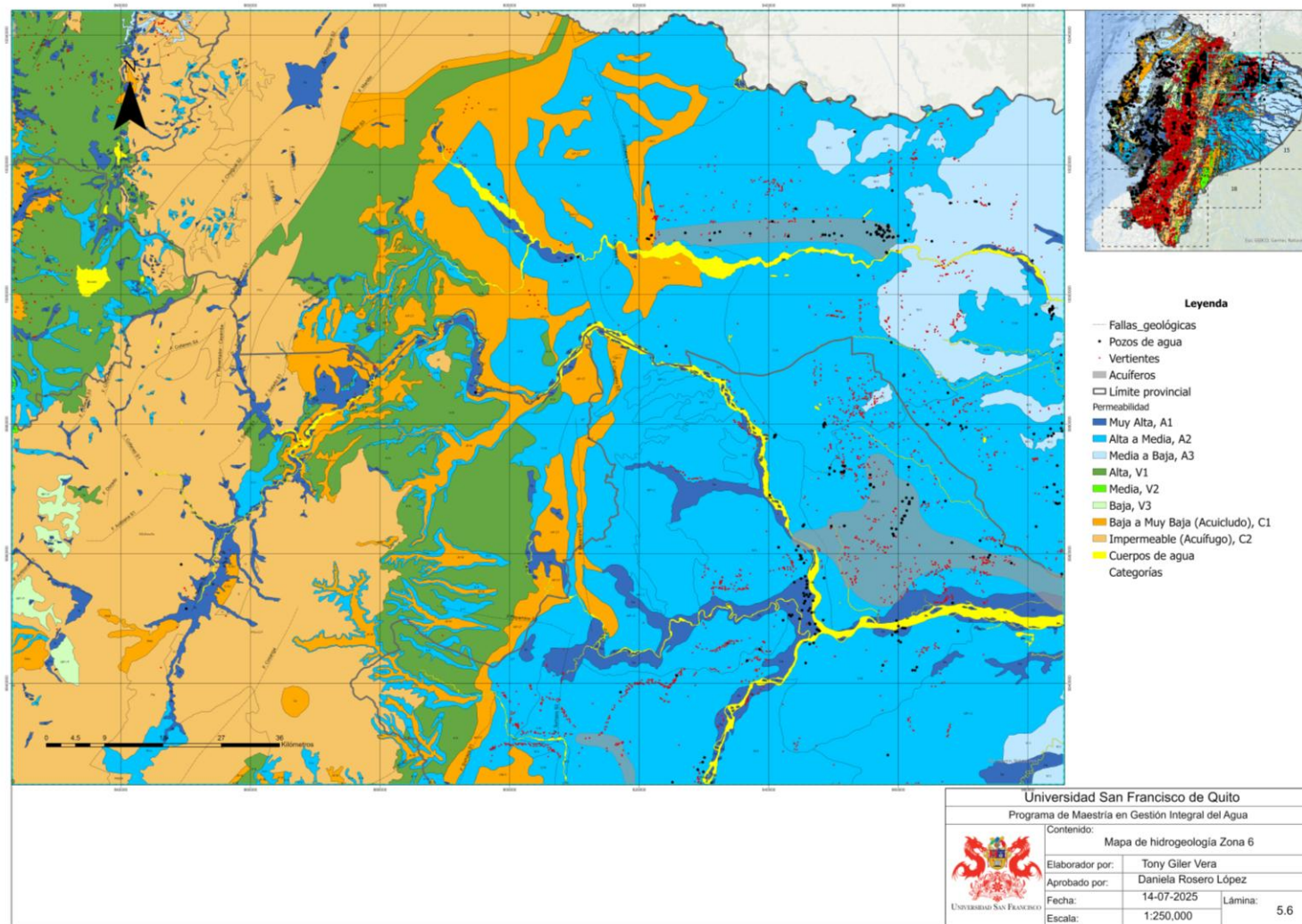
ANEXO I: Mapa de hidrogeología zona 4



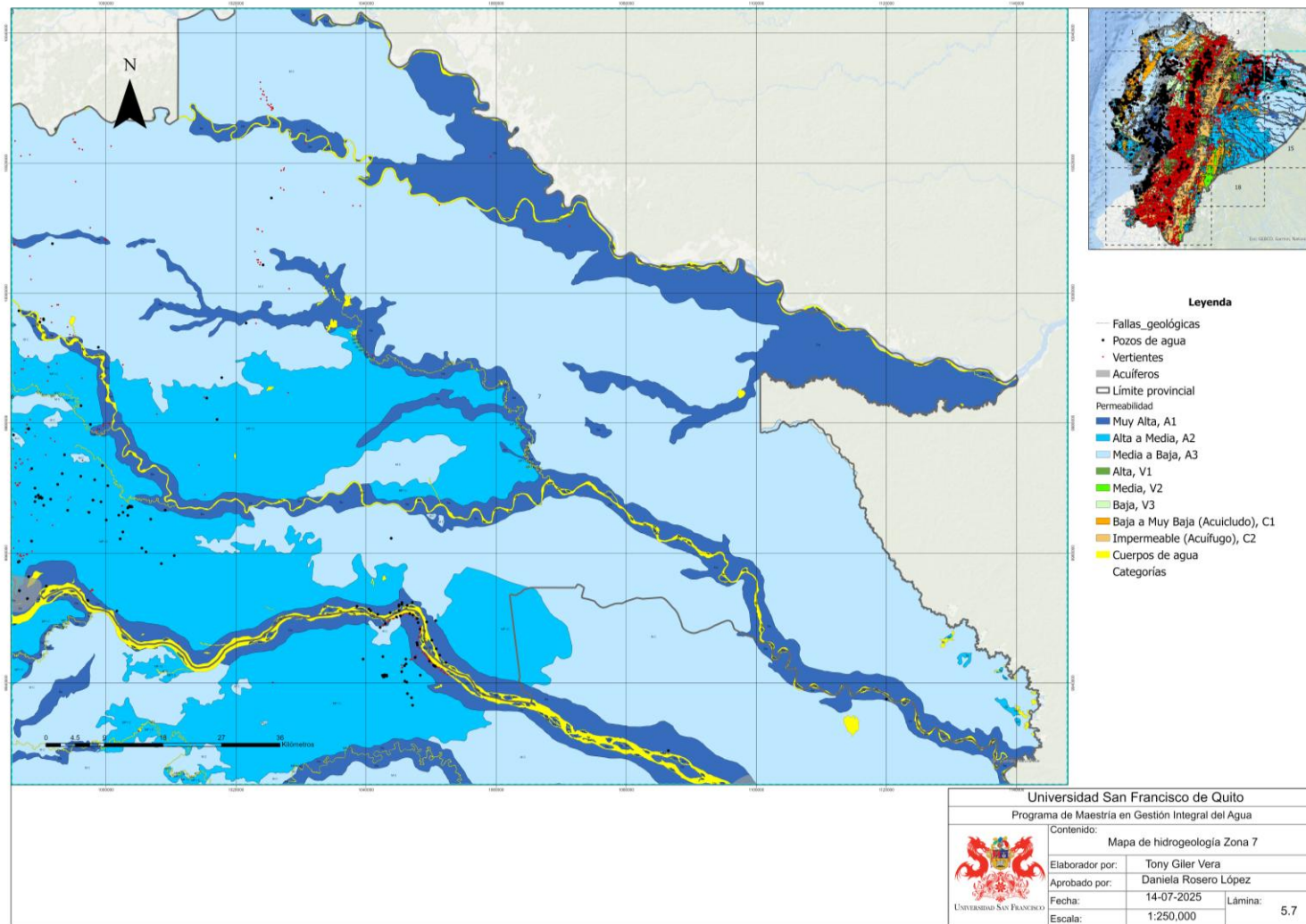
ANEXO J: Mapa de hidrogeología zona 5



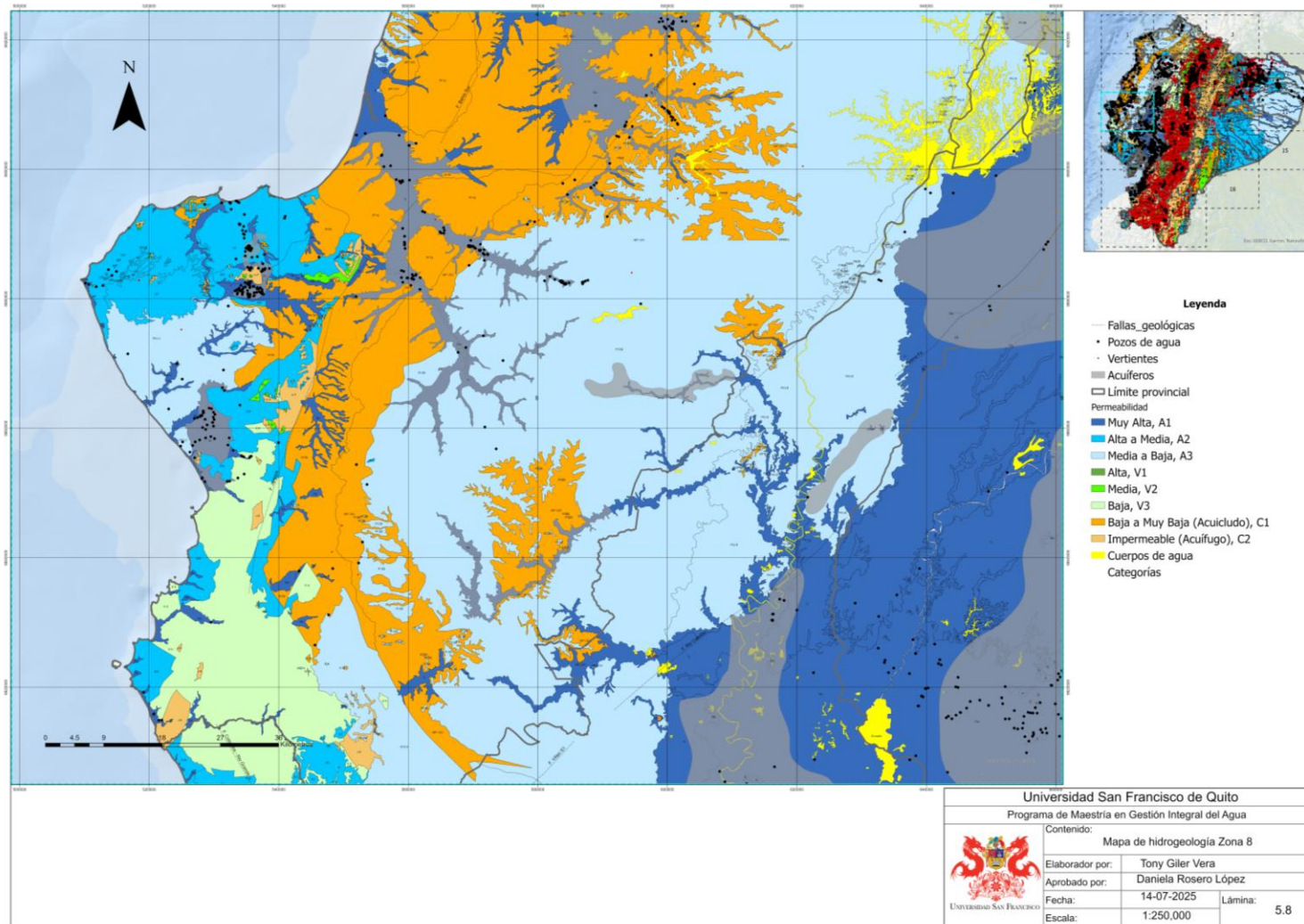
ANEXO K: Mapa de hidrogeología zona 6



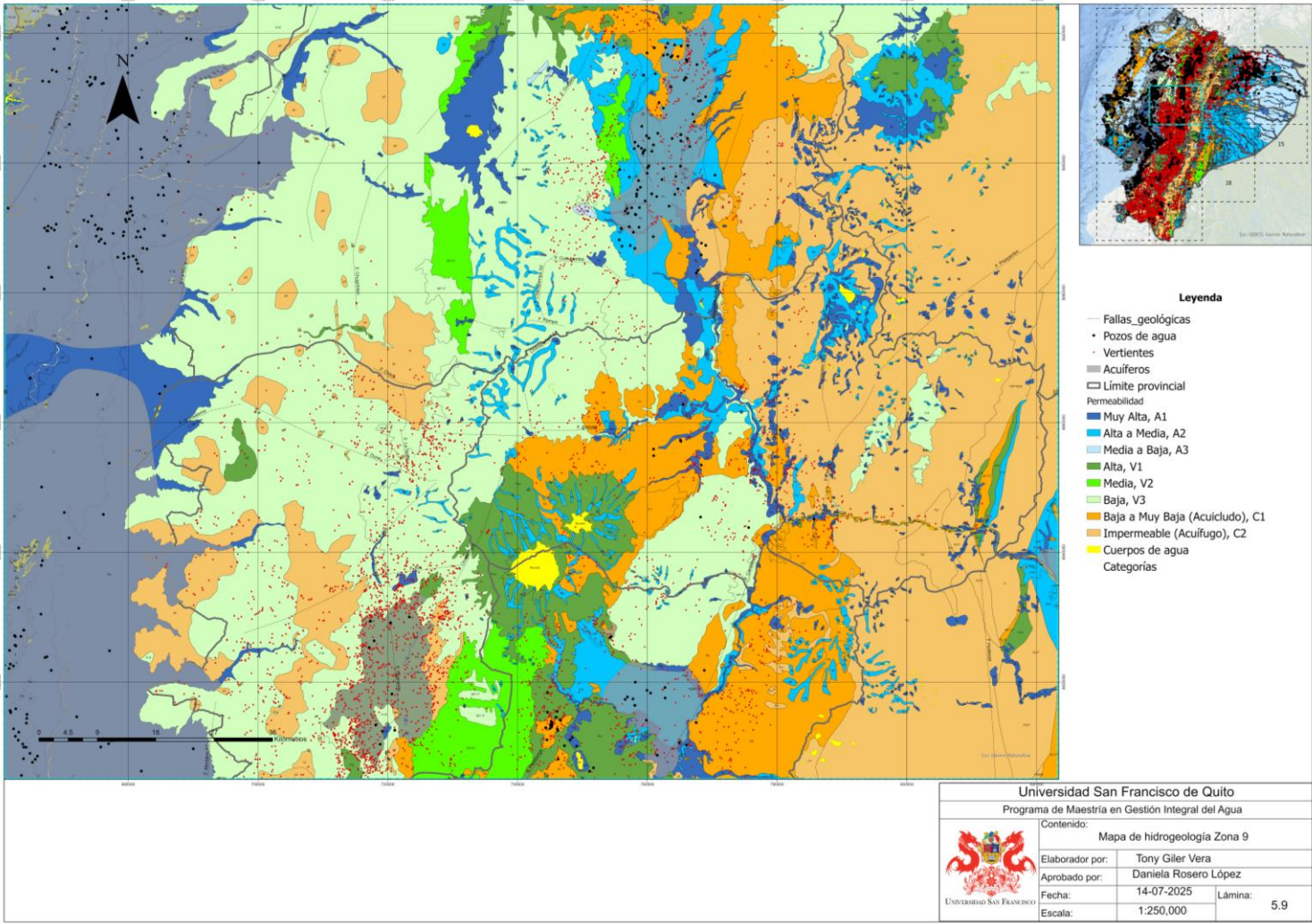
ANEXO L: Mapa de hidrogeología zona 7



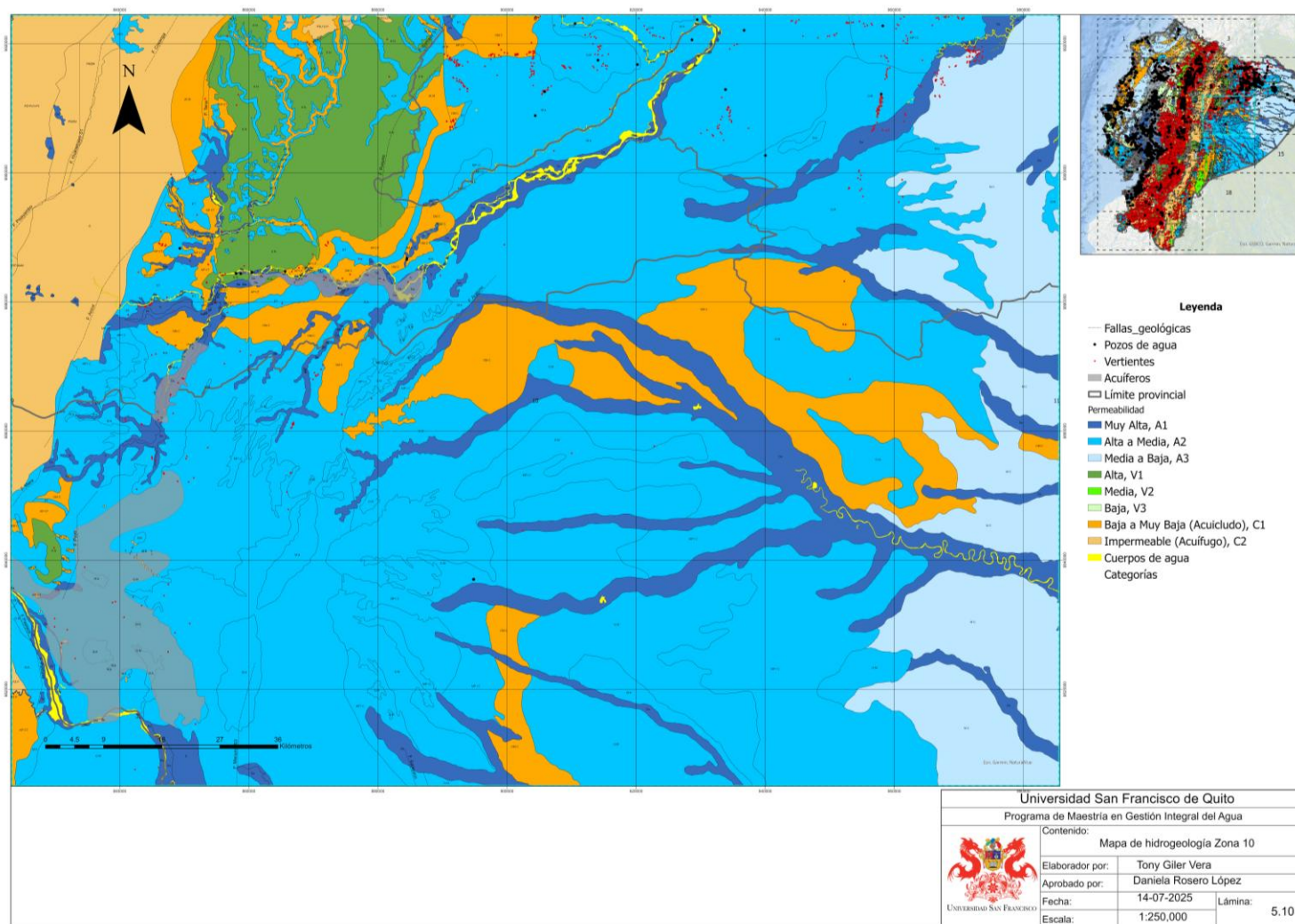
ANEXO M: Mapa de hidrogeología zona 8



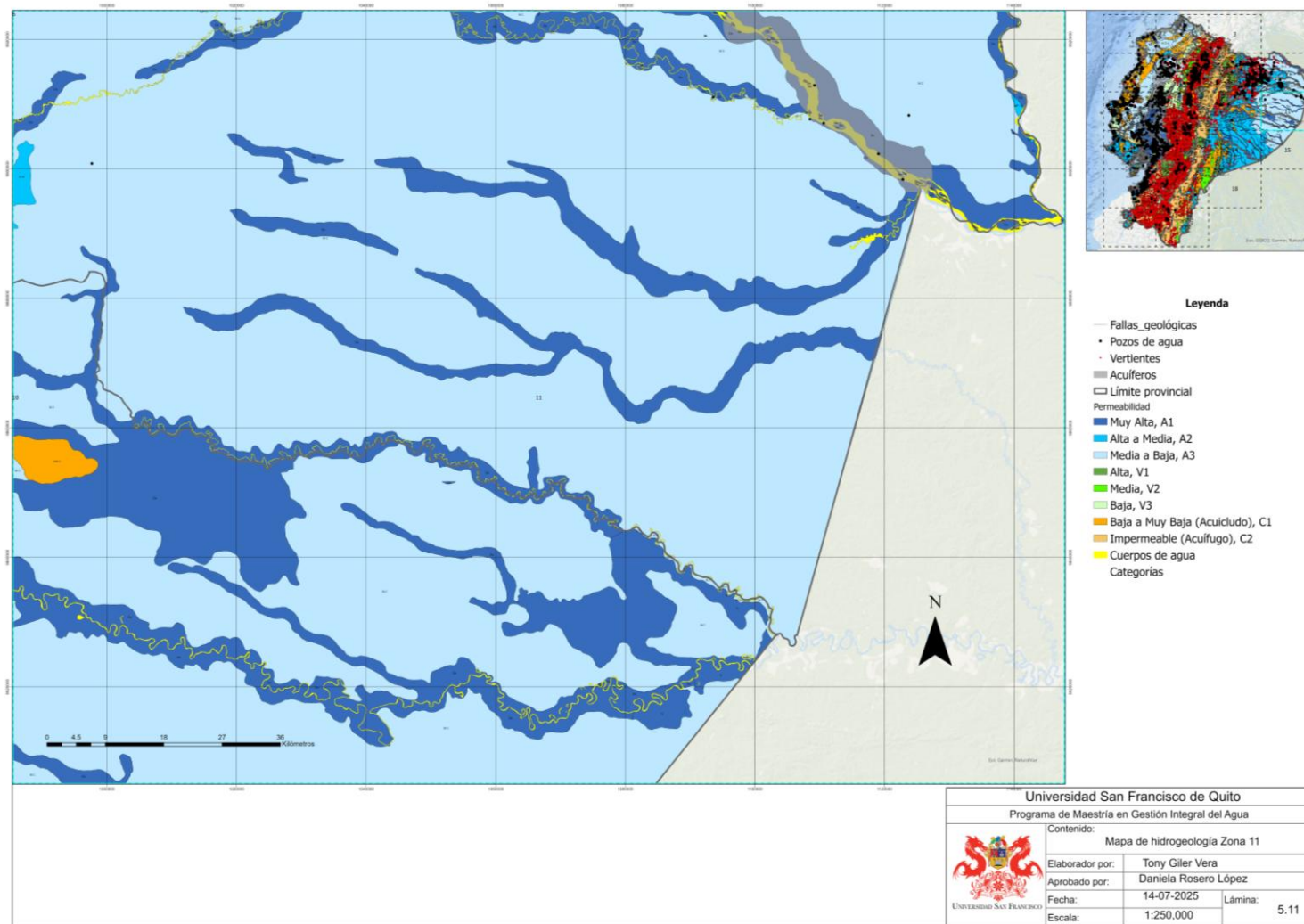
ANEXO N: Mapa de hidrogeología zona 9



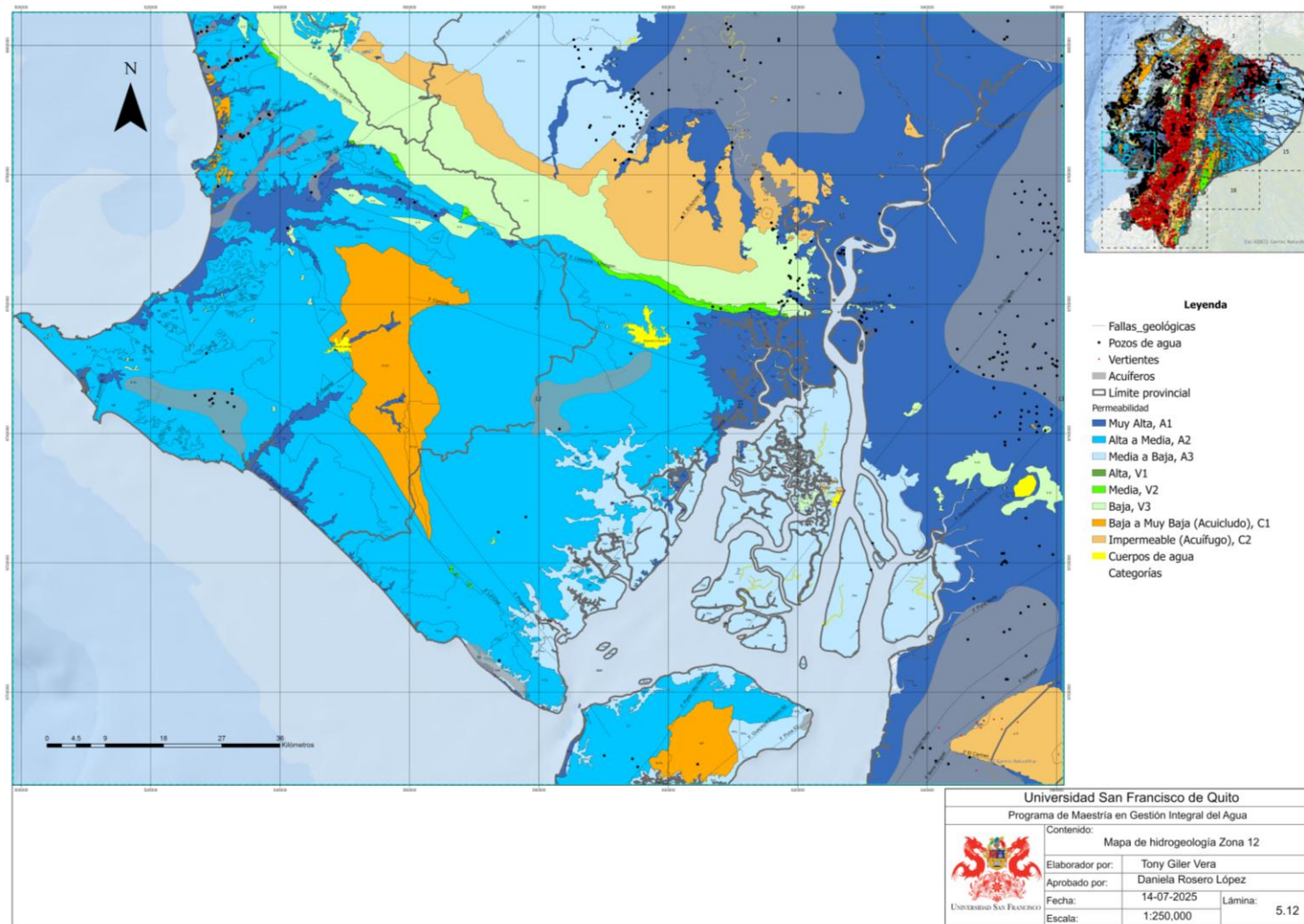
ANEXO O: Mapa de hidrogeología zona 10



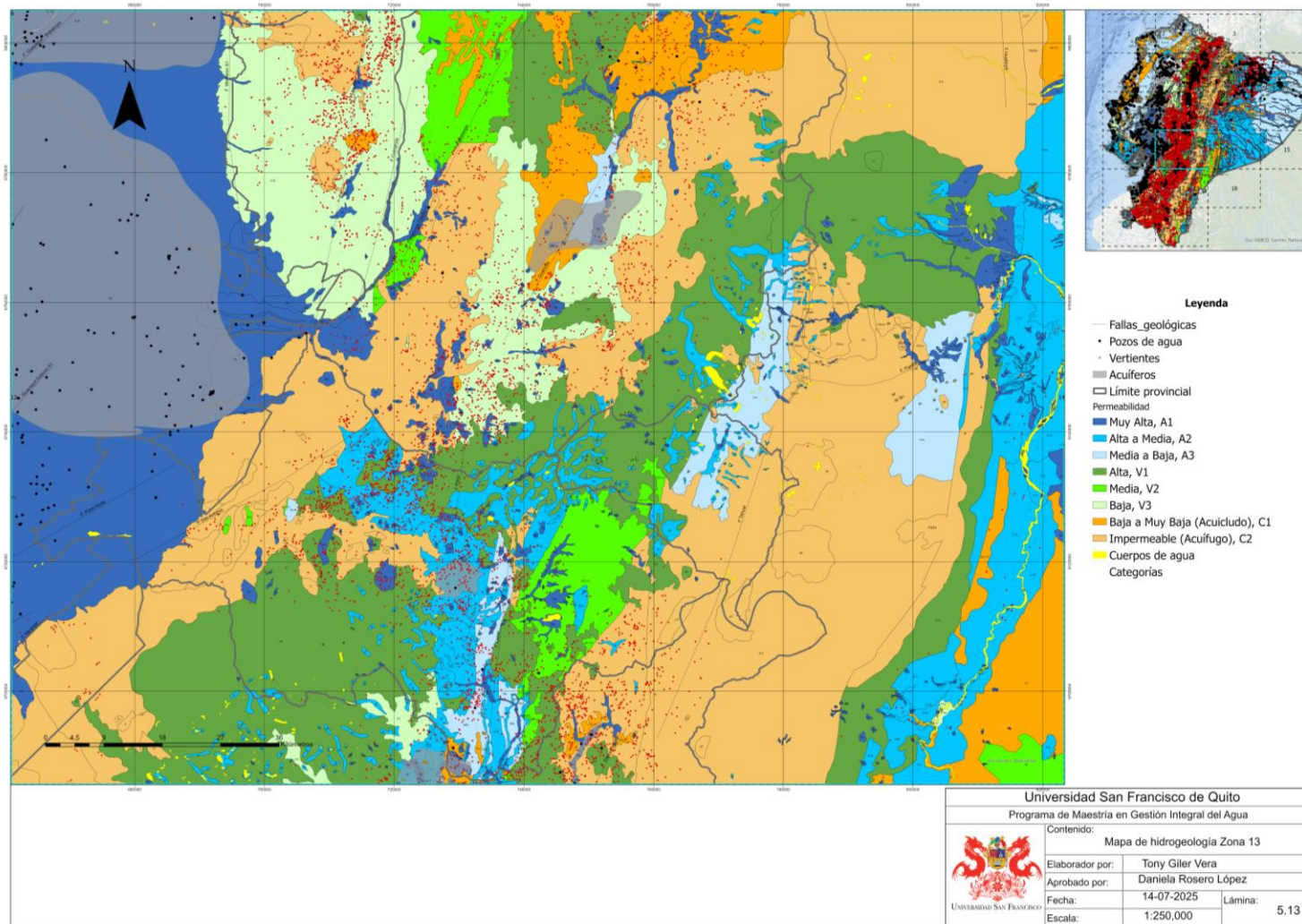
ANEXO P: Mapa de hidrogeología zona 11



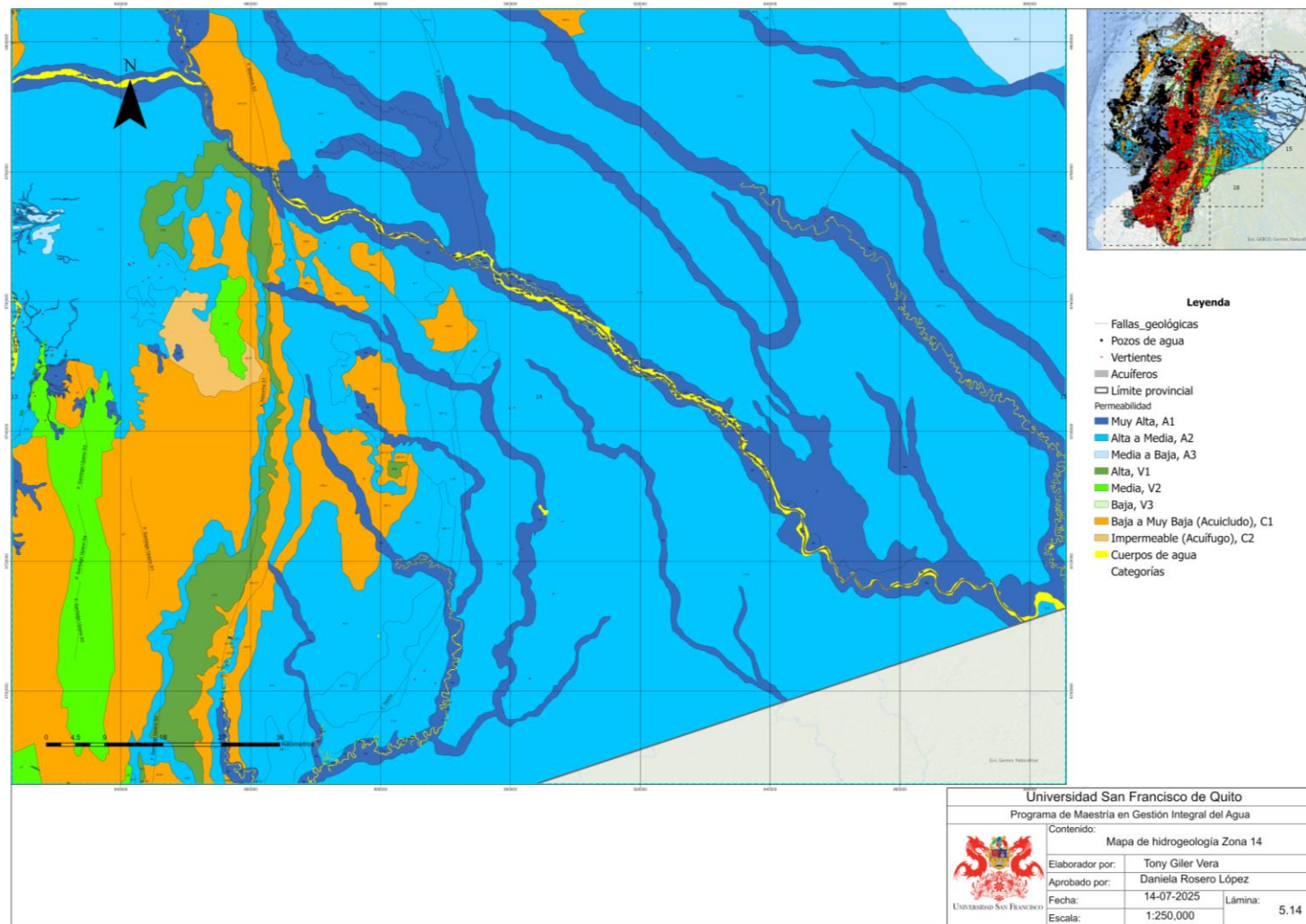
ANEXO Q: Mapa de hidrogeología zona 12



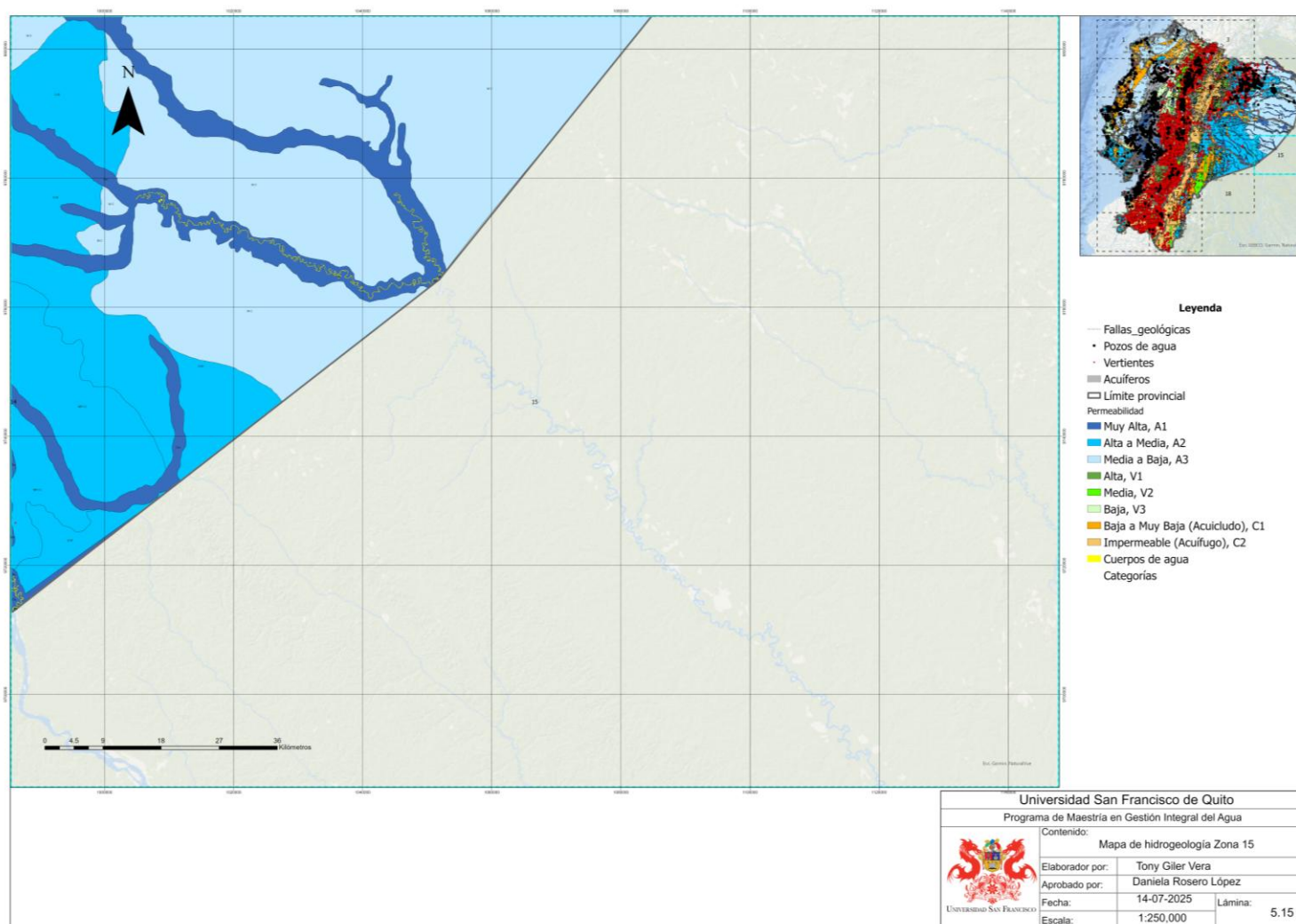
ANEXO R: Mapa de hidrogeología zona 13



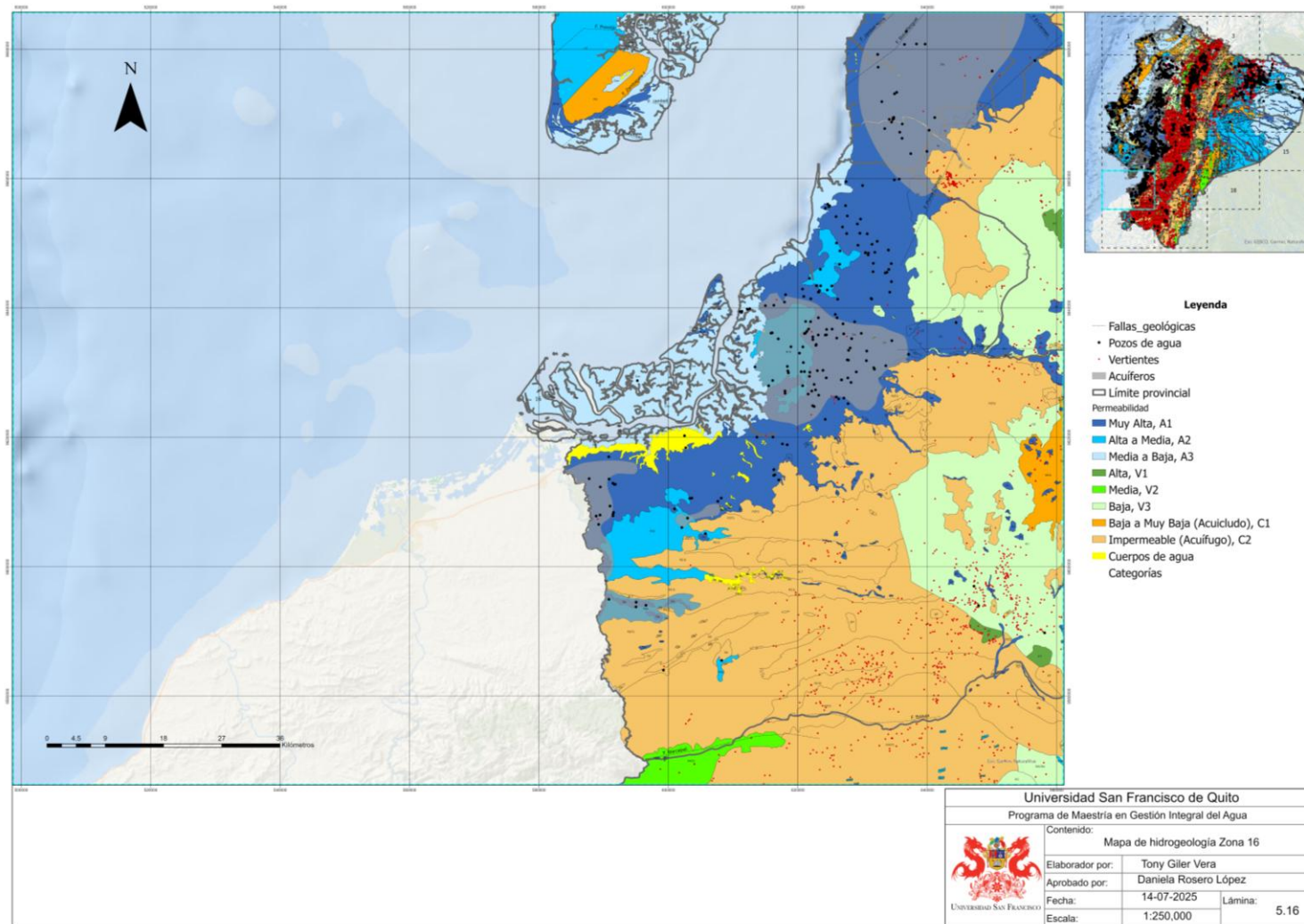
ANEXO S: Mapa de hidrogeología zona 14



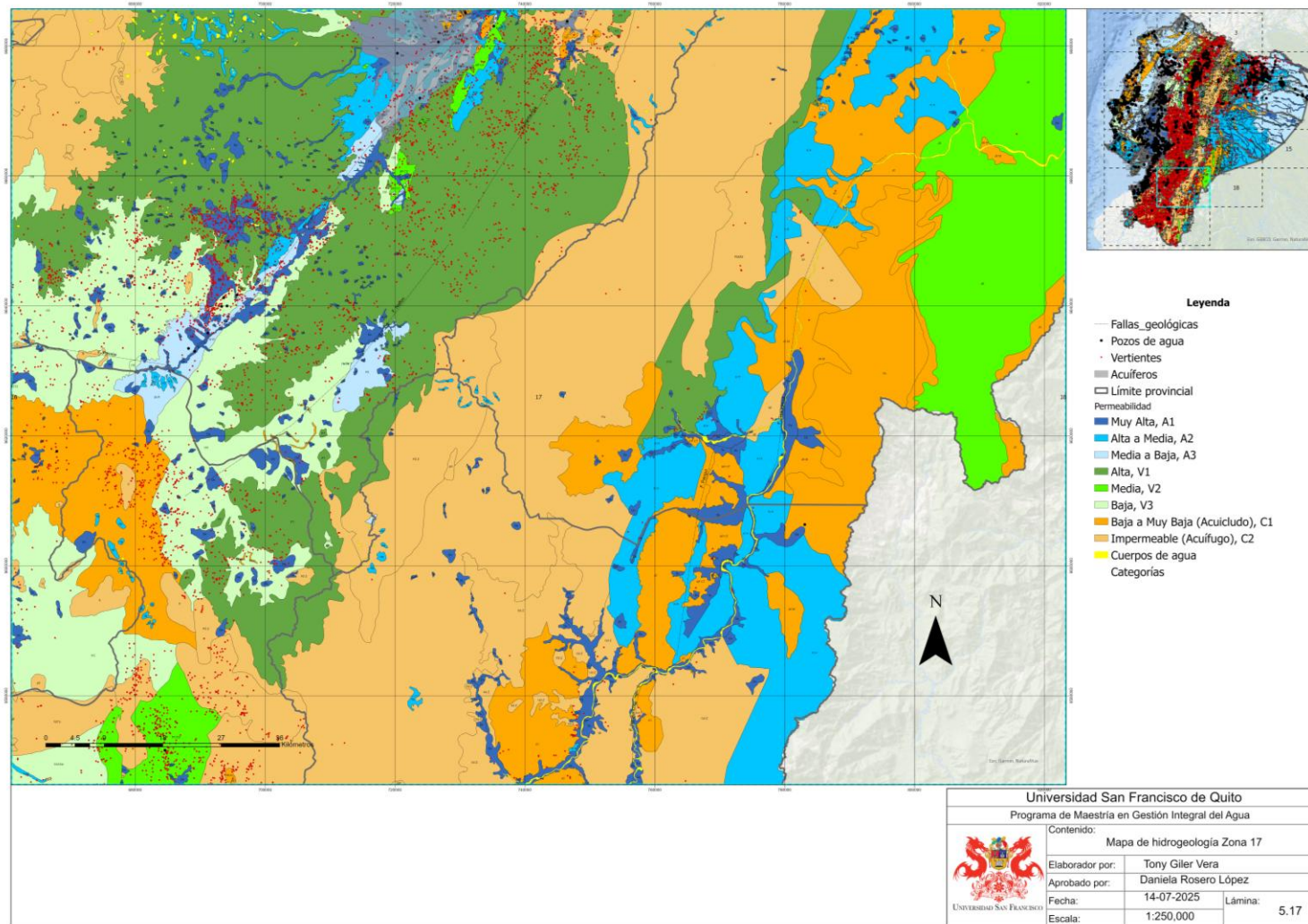
ANEXO T: Mapa de hidrogeología zona 15



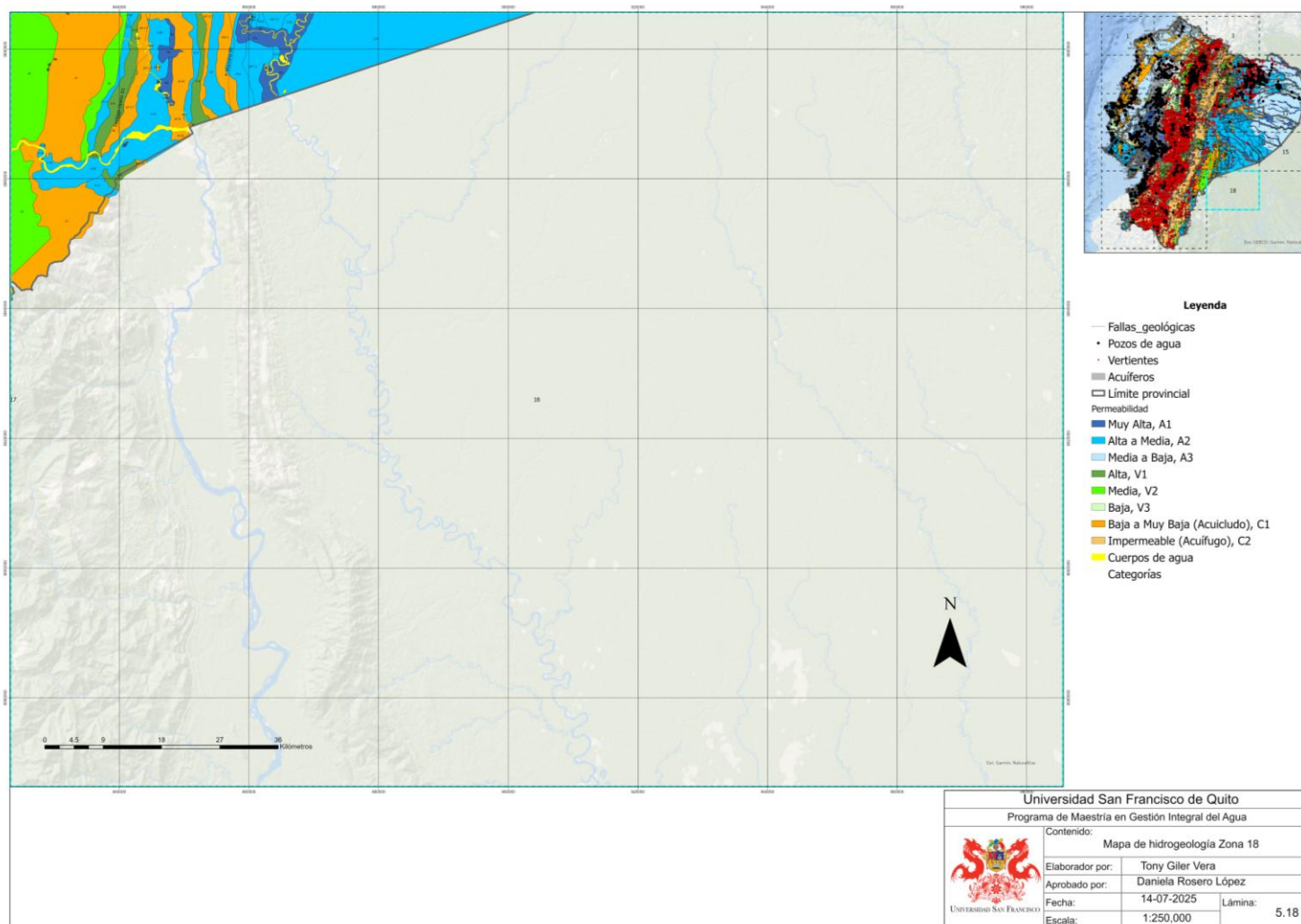
ANEXO U: Mapa de hidrogeología zona 16



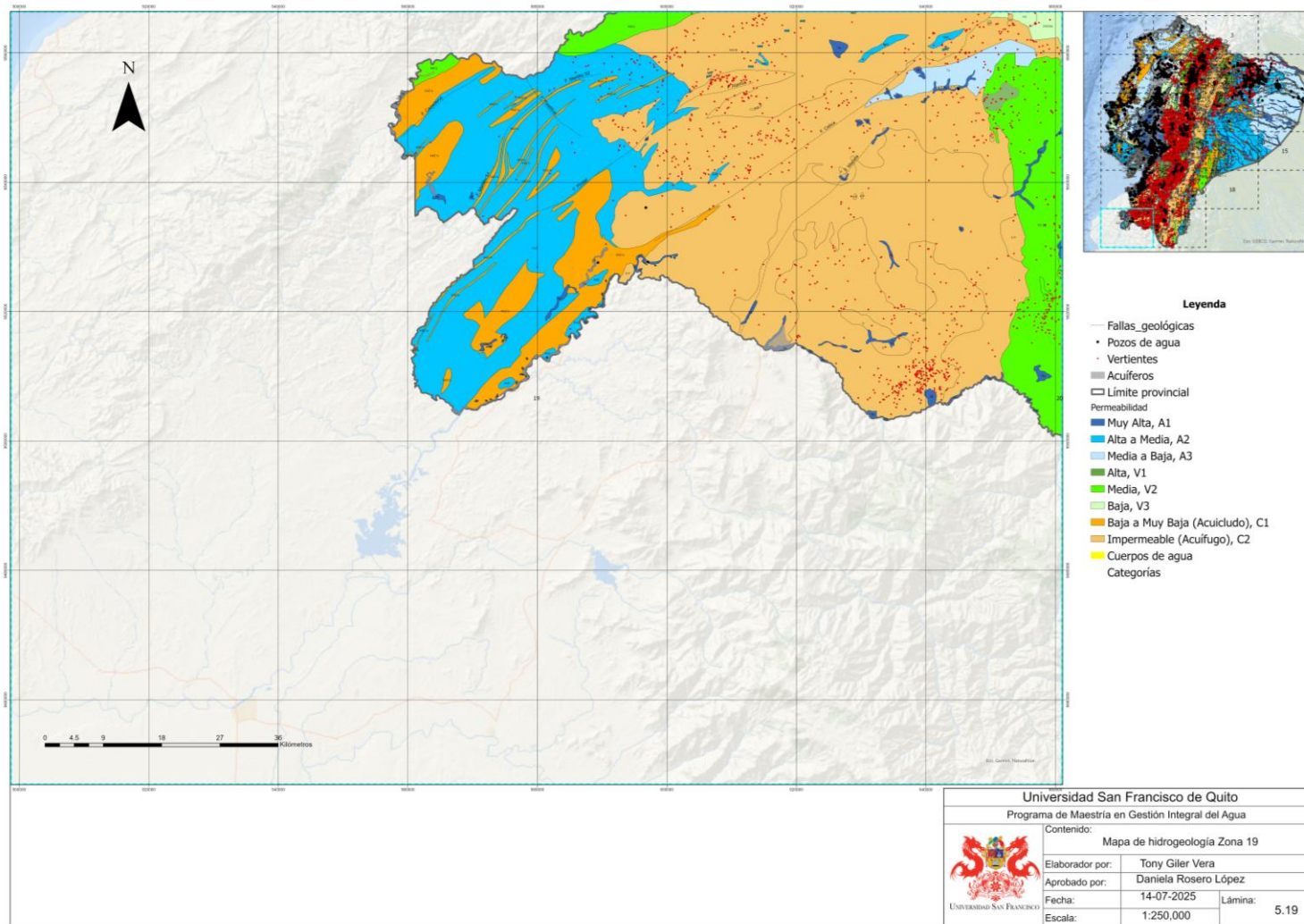
ANEXO V: Mapa de hidrogeología zona 17



ANEXO W: Mapa de hidrogeología zona 18



ANEXO X: Mapa de hidrogeología zona 19



ANEXO Y: Mapa de hidrogeología zona 20

