

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 ANTECEDENTES:.....	10
1.2 ESTADO DE LA INFORMACIÓN	14
1.3 JUSTIFICACIÓN:.....	17
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 CICLO HIDROLÓGICO: (WHEELARBRATOR CLEAN WATER INC., 1975)	19
2.2 CUENCA HIDROLÓGICA (VINTIMILLA & VIZHÑAY, 2009):	21
2.3 AGUA SUBTERRÁNEA (STEPHENSON, 2003)	23
2.4 RED DE MONITOREO.	36
3. MATERIALES Y MÉTODOS:.....	49
3.1 ÁREA DE ESTUDIO.	49
3.2 ANÁLISIS MULTICRITERIO.	66
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	87
4.1 MAPA MULTICRITERIO DE RECARGA DE ACUÍFEROS.	87
4.2 MAPA DE PROPUESTA, “UBICACIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS”	88
4.3 MAPA MULTICRITERIO DE UBICACIÓN DE ACUÍFEROS	91
4.4 MAPA DE PROPUESTA, “UBICACIÓN DE POZOS DE MONITOREO”	91
4.5 ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO TARQUI.	96
5. CONCLUSIONES	98
6. RECOMENDACIONES.....	99
BIBLIOGRAFÍA.....	101
7. ANEXOS	105
7.1 GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TARQUI.....	105
7.2 FUENTES DE INFORMACIÓN DISPONIBLES EN LA SUBCUENCA DEL RÍO TARQUI..	134
7.3 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE LOS POZOS DEL G.P.A.....	136

RESUMEN

El área de estudio la subcuenca del Río Tarqui, es una cuenca Andina perteneciente a la subcuenca alta del Río Paute, cuyas aguas corren hacia el Este, siendo parte de la red de ríos de la vertiente atlántica.

Se conoce, que la precipitación anual en la subcuenca del Río Yanuncay está entre los 900mm y 1.175mm mientras que el Río Tarqui tiene una precipitación anual entre 1.100mm y 1.300mm. El caudal medio es de 3,2 m³/s para el río Tarqui y 6,37 m³/s para el Río Yanuncay. Por otro lado, la subcuenca del Río Yanuncay está conformada por un 70% de área de páramo, mientras que la del Río Tarqui apenas comprende un 13%. Conociendo la capacidad para almacenar agua de los suelos presentes en los páramos, se supondría que la precipitación se vería más rápidamente reflejada en el río Tarqui que en el Río Yanuncay, hipótesis que no se da. Existe evidencia basada en topografía e hidromorfología que sugiere la presencia de un acuífero en la parte baja de la cuenca del río Tarqui. El área de la subcuenca del río Tarqui es de 476,30 km², mientras que la del río Yanuncay es de 418,89 km². También la evapotranspiración es de 700 mm/año, considerada la misma para las dos subcuencas.

Del análisis anterior, nace la siguiente interrogante: ¿Por qué teniendo similares características de clima y área, cuencas del río Yanuncay y Tarqui, el río Tarqui presenta caudales más bajos que el Río Yanuncay?



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Palma Zambrano Eduardo Dione, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Palma Zambrano Eduardo Dione
1716685191

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Villagómez Dávalos Eduardo Estevan, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Villagómez Dávalos Eduardo Estevan

0104069612

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Palma Zambrano Eduardo Dionei, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Palma Zambrano Eduardo Dionei
1716685191

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



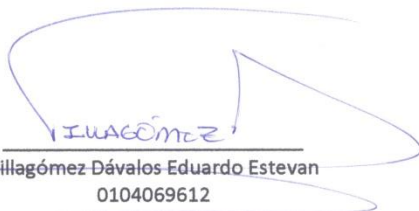
UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Villagómez Dávalos Eduardo Estevan, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.


Villagómez Dávalos Eduardo Estevan
0104069612

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103
Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA CIVIL



“ANÁLISIS, EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE UNA RED DE MONITOREO HIDROGEOLÓGICO PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO TARQUI.”

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

EDUARDO PALMA ZAMBRANO

EDUARDO VILLAGÓMEZ DÁVALOS

DIRECTOR:

ING. FELIPE CISNEROS E, PhD.

TUTOR:

ING. PABLO GUZMAN, MSc.

CUENCA – ECUADOR

2012

OCTUBRE



Dedicatoria

No existe nada ni nadie que pueda opacar el inmenso cariño que le tengo a mi familia. Esta tesis de grado, y todos los logros que he alcanzado y que Dios me permita obtener, van dedicados a ellos.

Los quiero mucho.

Agradecimientos

Este trabajo de tesis, no solo viene a ser un requisito de grado para la obtención de un título, es un documento, que representa el éxito plasmado del apoyo y cariño de todos quienes han formado parte de mi vida.

Agradezco a mis **padres** por el sacrificio, educación y amor brindado. Agradezco a **Dios** por haberme dado la oportunidad de ser su hijo. No existen palabras para describir lo maravilloso que se siente pertenecer a su familia.

A mi querido **hermano**, gracias por pelear conmigo, por quererme, por acompañarme, cada una de tus ocurrencias me han hecho olvidar de los tropiezos y malos ratos vividos.

A **ella**, gracias por darme una segunda oportunidad para cumplir con mis metas.

A todos mis **amigos** y **familiares** por todas las vivencias compartidas, ya que en el fondo son las relaciones con ustedes lo que ha dado valor a mi vida.

A la **Universidad de Cuenca** por permitir educarme en sus aulas, a todos los profesores que contribuyeron en mi formación, en especial a los ingenieros Esteban Pacheco y Juan Ugalde por enseñarme no solo temas académicos, sino como actuar con las personas y darle un nuevo matiz a mi forma de pensar; al personal de los diversos laboratorios que siempre estuvieron prestos para socorrerme en diversas situaciones, en especial a Lenin Cabrera, instrumentista del Laboratorio de Sistemas ¡Que gran persona!.

Al Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (**PROMAS**), por la oportunidad y la colaboración brindada para desarrollar la presente tesis, en forma especial al Ing. Felipe Cisneros y al Ing. Pablo Guzman, quienes nos han guiado y han estado pendientes en el transcurso de todo este tiempo.

Un agradecimiento especial para mi compañero de Tesis Eduardo Villagómez, ¡Barcelona lo logramos! gracias por soportarme todo este tiempo, te deseo lo mejor amigo.

A Juanito y a Joys por las mil y un aventuras vividas para desarrollar nuestras tesis.

“Lo que creamos o lo que pensemos, al final no tiene mayor importancia. Lo único que realmente importa es lo que hacemos.”

Eduardo Palma Zambrano.



Dedicatoria

A Dios, simplemente por hacerme lo que soy y caminar a mi lado.

“Si caes es para levantarte, si te levantas es para seguir, si sigues es para llegar a donde quieres ir y si llegas es para saber que lo mejor está por venir.”

Elbano Mendoza.

Agradecimientos

Hay tantas personas que merecen ser reconocidas y nombradas que simplemente tendría que abrir un capítulo solo para ellos. Las palabras no pueden expresar lo eternamente agradecido que estoy con todas aquellas personas que de una forma directa o indirectamente colaboraron con el desarrollo de esta tesis, y de mi formación como persona.

Mi viejita, Malenita, el milagro que Dios hizo para mí, gracias.

Papá, por estar ahí, brindarme tu apoyo y nunca, nunca dejarme caer, ojala algún día llegue a ser la mitad de lo que eres tú. Gracias eres mi ejemplo a seguir.

No podía faltar mi mami, con su toque maternal y su infinito cariño, simplemente hacia que lo difícil pareciera un juego de niños. Gracias Mamina.

Mis hermanos, que mejores amigos que los que vienen caminando contigo toda tu vida. Jota, mucho de lo que soy es gracias a tu ejemplo, mi Manita, mi segunda mamá cuando lo necesitaba, solo Dios sabe lo que siento por ti.

Mi Mors, por estar conmigo codo a codo peleando los días difíciles y riendo en los buenos momentos, por ser incondicional, gracias. p.s. I Love You.

Ing. Felipe Cisneros, gracias por mi excelencia y formación profesional, gracias por su guía y su apoyo.

Al PROMAS, y a todos sus personeros por el apoyo incondicional para este trabajo.

A mi compañero de tesis, Eduardo Palma “pilas Barcelona, lo logramos”.

A Juanito Barbecho y Johana Calle, por el tiempo compartido y las experiencias brindadas.

Eduardo Villagómez Dávalos.



“Niéguesele a un hombre su alimento y podrá vivir durante días. Pero, quítesele el agua y la muerte sobrevendrá en término de horas. Solo la falta de aire lo aniquilaría más pronto”

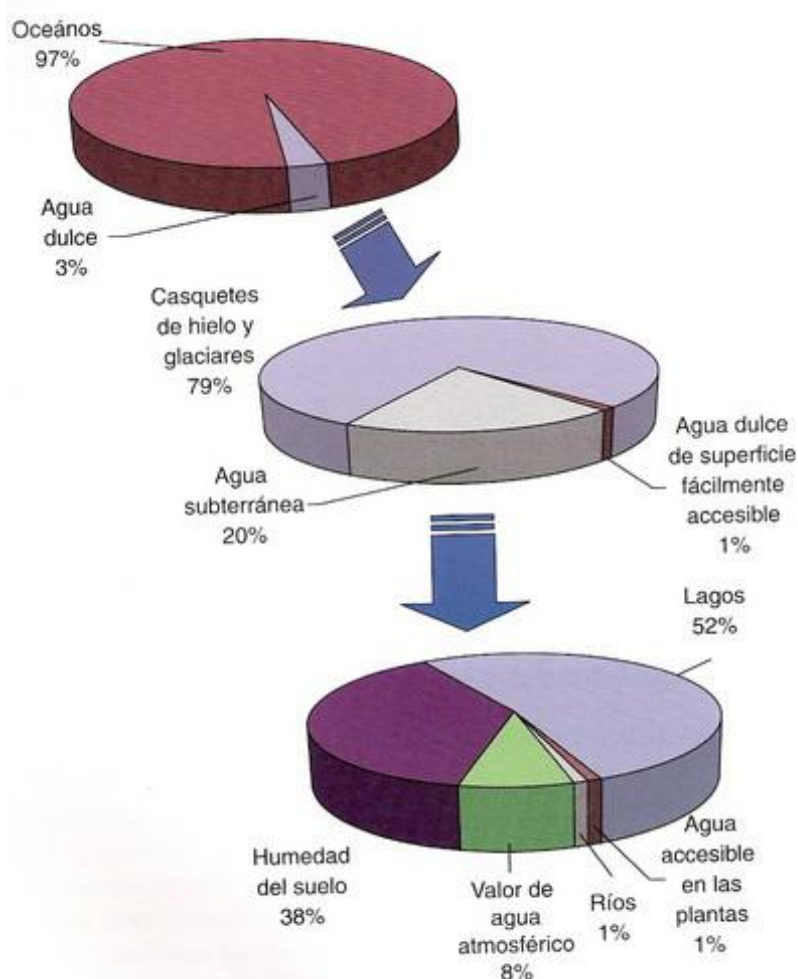
Wheelabrator Clean Water Inc.

1. Introducción

1.1 Antecedentes:

El agua potable es un recurso invaluable, especialmente cuando la población excede la capacidad de abastecimiento de una fuente determinada.

La mayor parte de la superficie terrestre está cubierta por agua de mar, aproximadamente un 2,5 por ciento es agua dulce, y dos tercios de esta se encuentra congelada en las capas heladas y glaciares. Los reservorios subterráneos constituyen un recurso importante de suministro de agua para muchas personas. Por siglos la humanidad ha hecho uso de pozos para



explotar los acuíferos renovables y no renovables para saciar su sed y regar los cultivos. (Academias, 2007)

Ilustración 1-1 Distribución de Agua en la Tierra (EducaSitios, n.d.)



Si de la totalidad del agua dulce existente en el planeta, excluimos el agua de los glaciares, el agua dulce utilizable representa apenas una parte muy pequeña del agua del planeta tal como se muestra en la Ilustración 1-1.

La planificación adecuada del uso de los recursos naturales se hace cada vez más imperiosa si se desea que estos perduren para las nuevas generaciones. El agua no es una excepción; siendo por muchos considerada como la causa de las guerras del futuro, debe darse la importancia que amerita. (Guzman 2011)

Por lo mencionado anteriormente, es necesario realizar un monitoreo de las fuentes de agua que se poseen. La presente tesis contempla una recopilación, digitalización y análisis de toda la información existente en relación al agua subterránea en la Subcuenca del Río Tarqui, con la finalidad de determinar las zonas más factibles para la ubicación de equipos de monitoreo.

El área de estudio la Sub Cuenca del Río Tarqui, es una Cuenca Andina perteneciente a la Sub Cuenca alta del Río Paute, cuyas aguas corren hacia el Este, siendo parte de la red de ríos de la vertiente atlántica.

Se conoce, por parte del INHAMI que la precipitación anual en la Cuenca del Río Yanuncay está entre los 900mm y 1.175mm mientras que el Río Tarqui tiene una precipitación anual entre 1.100mm y 1.300mm. Según ETAPA (2011), el caudal medio es de 3,2 m³/s para el Río Tarqui y 6,37 m³/s para el Río Yanuncay. La publicación (Guzman et al., 2012) presenta valores comparativos de descargas y precipitaciones entre ambos ríos. Ver Ilustración 1-2 e Ilustración 1-3. Esta misma publicación, manifiesta que la Sub Cuenca del Río Yanuncay está conformada por un 70% de área de páramo, mientras que la Sub Cuenca del Río Tarqui apenas comprende un 13%. Conociendo la capacidad para almacenar agua de los suelos presentes en los páramos, se supondría que la precipitación se vería más rápidamente reflejada en el río Tarqui que en el Río Yanuncay, cosa que no se da. Existe evidencia basada en topografía e hidromorfología que sugiere la presencia de un acuífero en la parte baja de la cuenca del río Tarqui. (Guzman et al., 2012). Según CELEC EP (2012) el área de la Subcuenca del río Tarqui es de 476,30 km², y el área de la Subcuenca del río Yanuncay es de 418,89 km². También la evapotranspiración es la misma para las dos Subcuencas, según CG Paute (2012) es de 700 mm/año.

Considerando lo planteado en el párrafo anterior, es decir la similitud que tienen ambas Subcuencas, nace la siguiente interrogante: ¿Por qué teniendo similares características de clima y área, cuencas del río Yanuncay y Tarqui, el río Tarqui presenta caudales más bajos que el Río Yanuncay?

Comparación de caudales específicos

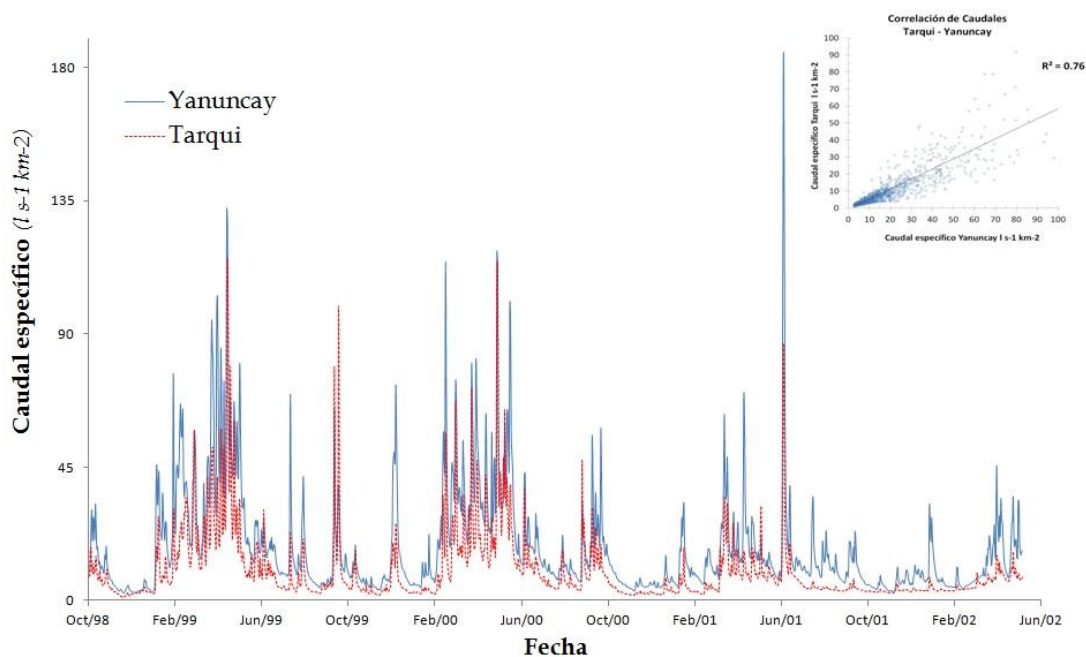


Ilustración 1-2 Comparativa de Descargas Totales de los Ríos Yanuncay y Tarqui. (P Guzman et al., 2012)

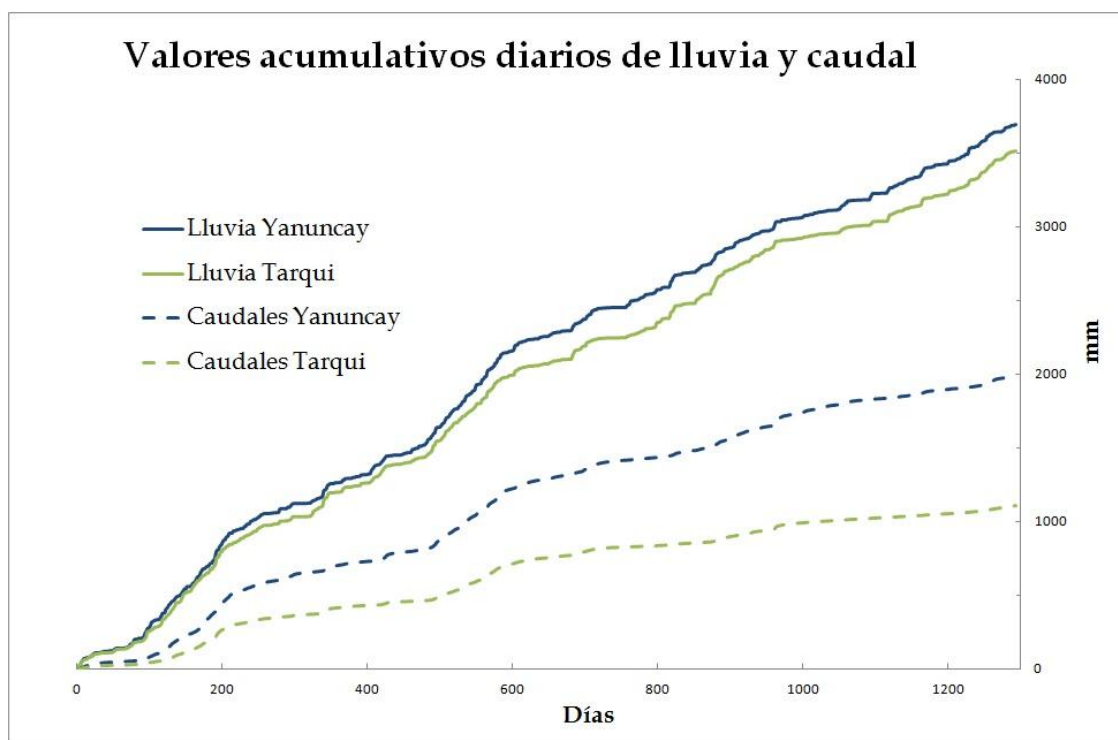


Ilustración 1-3 Acumulación Diaria de Valores de Precipitación y Descarga de los Ríos Yanuncay y Tarqui. (Guzman et al., 2012)

Se han llegado a proponer las siguientes hipótesis (Guzman et al., 2012):

- El agua de la precipitación recarga un acuífero, esto significa que existen flujos preferenciales antes de descargar en el Río Tarqui. Ilustración 1-4

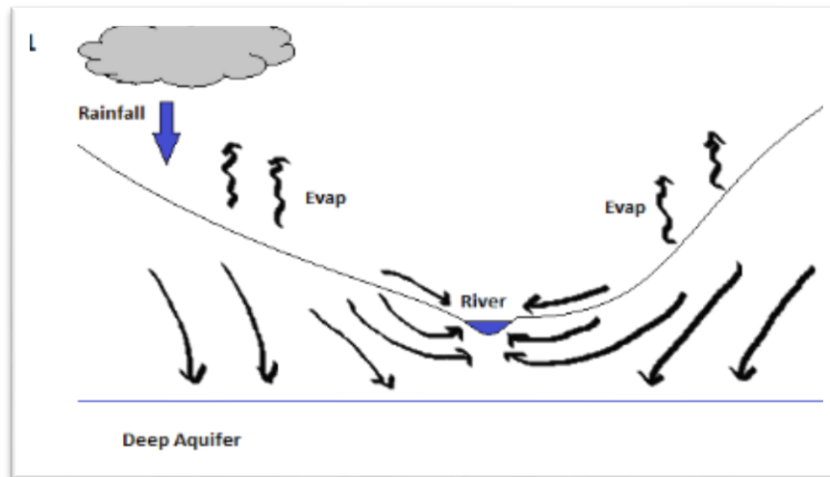


Ilustración 1-4 Hipótesis de un Acuífero Profundo (Guzman et al., 2012)

- El agua es conducida desde las partes altas, hasta las partes bajas del valle en donde emergen varios manantiales, que son evaporados. Entonces la evaporación total es muy diferente en las sub cuencas, y no son similares como se asumen. Ilustración 1-5

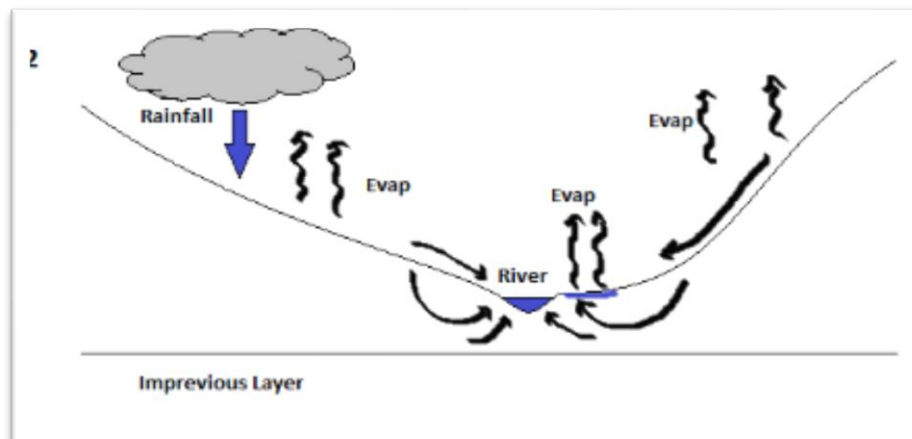


Ilustración 1-5 Hipótesis de una Alta Evapotranspiración (Guzman et al., 2012)

- El agua es capturada y acarreada hacia otras cuencas por formas naturales o artificiales; una forma natural puede ser el flujo a lo largo de las fracturas que están presentes en el valle del Río Tarqui. Ilustración 1-6

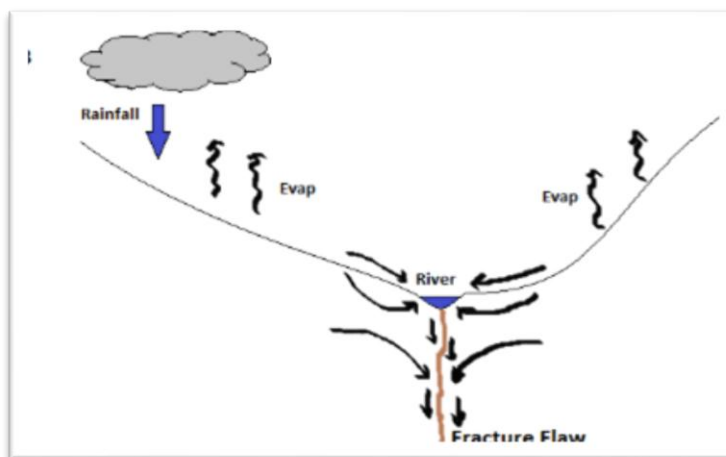


Ilustración 1-6 Hipótesis de Flujo Preferencial (Guzman et al., 2012)

1.2 Estado de la Información

En el Ecuador, la institución encargada de tratar temas relacionados con el agua es el SENAGUA (Secretaría Nacional del Agua), sin embargo, en su página web no se registra información referente a aguas subterráneas en la provincia del Azuay.

En la provincia del Azuay, el Gobierno Provincial del Azuay (G.P.A) es quien maneja información relacionada al tema del agua subterránea, ya que ha venido realizando perforaciones para extracción desde el año 2004, por otro lado ETAPA EP realiza monitoreos meteorológicos de la región.

A nivel privado, la Corporación I'm Gold S.A Ecuador, ha realizado una serie de perforaciones para la ubicación de piezómetros en el sector de Quimsacocha localizados en la parte occidental de la Subcuenca de estudio.

En la Sub Cuenca del Río Tarqui, la Universidad de Cuenca, a través del PROMAS con el proyecto VLIR/IUC (Consejo de Universidades Flamencas / Programa de Cooperación Institucional Universitario), ha desarrollado varias publicaciones científicas (CG Paute, 2012; Coronel, 2005; Guzman et al., 2012; Pablo Guzman, 2004; Pericles, 2009; entre otros) en lo que refiere a manejo, calidad y desarrollo del recurso hídrico. Sin embargo, no existe mayor información correspondiente a aguas subterráneas de la cuenca mencionada.

Existe un convenio de colaboración interinstitucional (Nº 163-2011), celebrado entre el Gobierno Provincial del Azuay y la Universidad de Cuenca, para ampliar estudios, compartir información y resultados de investigación en hidrogeología dentro de la Cuenca del Río Paute, Sub Cuenca del Río Tarqui.

No existe un plan integral para el monitoreo de aguas subterráneas en la Sub Cuenca del Río Tarqui, La intención de este trabajo de graduación es generar criterios basados en los datos disponibles para la implementación de dicha red.

Dentro de la Subcuenca de estudio, existen perforaciones para extraer agua subterránea, con el plan de monitoreo, se logrará conocer el estado de los acuíferos, su ubicación y también se les podrá dar un seguimiento mientras son explotados, estableciendo así un plan de exploración y explotación sostenible y amigable con el medio ambiente.

A continuación se muestra la distribución espacial de las fuentes de información disponibles actualmente en la Sub Cuenca del Río Tarqui. Ver

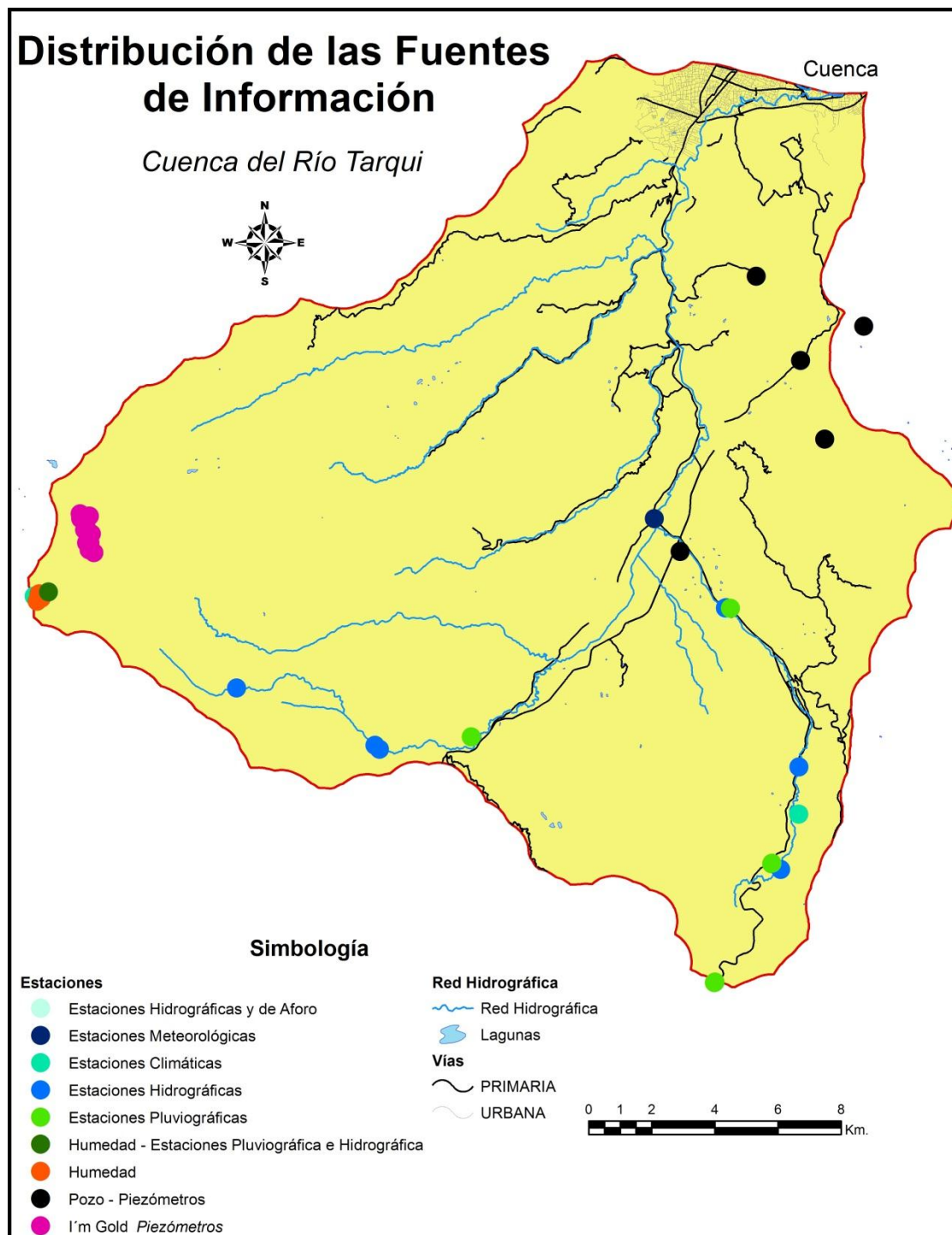


Ilustración 1-7, se utilizara también los resultados de conductividad de la Subcuenca del Río Tarqui de (Barbecho & Calle, 2012), que se encuentran en



estado de revisión. En la sección de anexos se podrán encontrar información más a detalle.



1.3 Justificación:

La información existente es incompleta, e insuficiente para entender y establecer con certeza la ocurrencia de agua subterránea en la Sub Cuenca del Rio Tarqui. Por esta razón es preciso establecer una red de monitoreo para complementar dicha información, y generar un historial de datos importantes que afirmen las hipótesis de la presencia de acuíferos en la zona.

Debido a la necesidad de generar información, la presente tesis abordará la tarea de establecer las zonas más idóneas para ubicar puntos de monitoreo, optimizando de esta forma el uso de los recursos financieros.

Esta investigación debido a las limitaciones del conocimiento de la cuenca de estudio, y a la necesidad de crear información, se basará en una serie de suposiciones y simplificaciones de los datos existentes. Se relacionará la información para generar un análisis multicriterio que nos permita obtener las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de aguas subterráneas y por ende la ubicación de los puntos para la ubicación de equipos de monitoreo.

Esta tesis servirá de base para la implementación de una red de monitoreo, coadyuvando de esta manera a investigaciones futuras que profundicen el conocimiento de calidad y cantidad de aguas subterráneas en el área de estudio.

Alcance:

El presente proyecto de investigación tiene como meta, la generación de un mapa con las zonas más aptas para establecer puntos de monitoreo, empleando para ello un análisis multicriterio basado en la información existente.

Objetivo General:

Complementar una red de monitoreo en la Sub Cuenca del Rio Tarqui, con el fin de generar datos e información para investigación de agua subterránea, complementando el estudio integral del agua tanto en calidad como cantidad.

Objetivo Específico:

Determinar los mejores sitios para ubicación de estaciones de monitoreo de aguas subterráneas y estaciones climatológicas.

Crear una base de datos hidrogeológicos que contengan información histórica y nueva, recopilada a lo largo y posterior al desarrollo de esta tesis, y motivar a que se continúe con la incorporación de nuevos datos a la misma.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

2. Marco Teórico

Estableceremos una base conceptual para lograr mayor entendimiento del ciclo del agua, la relación entre agua superficial- agua subterránea, factores que tienden a mejorar el movimiento del agua a través del suelo y la necesidad de una red de monitoreo para el cuidado, manejo y adecuada explotación de acuíferos.

En este capítulo se busca establecer criterios para encontrar zonas de recarga y la ubicación de los acuíferos, las cuales están directamente relacionadas con la óptima ubicación de puntos de monitoreo.

2.1 Ciclo Hidrológico: (Wheelabrator Clean Water Inc., 1975)

El ciclo hidrológico constituye un sistema mediante el cual la naturaleza hace circular el agua desde los océanos hasta la atmósfera y la retorna de nuevo en forma superficial y subterránea, a través de varias rutas, cortas algunas y largas otras, en términos de espacio y tiempo. Las fuerzas involucradas en este proceso comprenden radiación, fuerza gravitacional, atracción molecular y capilaridad. Los hechos más destacados del ciclo hidrológico se muestran en la Ilustración 2-1.

Es importante destacar que el ciclo no tiene principio ni fin, en el gráfico se ha numerado para efectos ilustrativos, los procesos ocurren en forma continua.

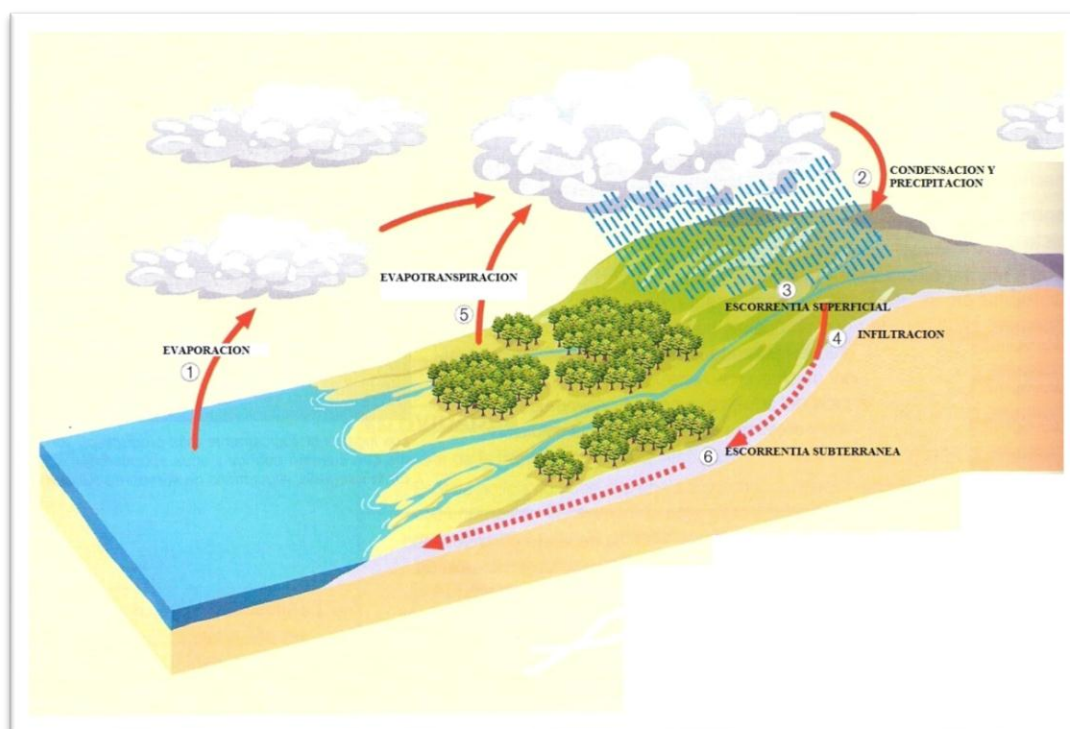


Ilustración 2-1 Ciclo Hidrológico (Institut d'Educació Secundaria Francesc Gil, 2012)



1. **Evaporación.** Las radiaciones solares calientan el agua de los océanos, parte de ella se transforma en vapor y pasa a la atmósfera.
2. **Condensación y Precipitación.** El vapor de agua se enfría y forma nubes, que devuelven el agua a la superficie terrestre en forma de lluvia o nieve. Desde el punto de vista de la hidrología, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua. Una lluvia moderada de larga duración, favorece la infiltración. Las lluvias intensas saturan muy rápidamente el suelo, perdiéndose gran parte de éstas en escorrentía superficial. (Wheelabrator Clean Water Inc., 1975)
3. **Escorrentía Superficial.** Parte del agua de lluvia discurre por la superficie formando arroyos y ríos. El agua irá a parar a los lagos o al mar. Despreciando la interceptación por vegetación, la escorrentía superficial es aquella parte de la lluvia que no es absorbida por el suelo mediante infiltración. Si el suelo tiene una capacidad de infiltración entonces cuando la intensidad de la lluvia es menor que dicha capacidad, la lluvia es absorbida completamente y no existe escorrentía superficial.
4. **Infiltración.** Parte del agua precipitada atraviesa la superficie del terreno y pasa a ocupar poros y oquedades del suelo, incorporándose a las aguas subterráneas.
5. **Evapotranspiración.** Otra parte del agua precipitada se queda en la zona superior del suelo y de ahí se evapora pasando al aire. La transpiración de las plantas también suministra al aire vapor de agua. Dada la dificultad de diferenciar en la práctica la transpiración de la evaporación del agua del suelo, se habla de evapotranspiración.
6. **Escorrentía Subterránea.** También el agua subterránea circula. Lo hace a través de los poros y grietas del subsuelo.

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Al escurrimiento se lo puede dividir en tres clases: escurrimiento superficial, sub superficial y escurrimiento subterráneo.

El agua que se infiltra en el suelo se denomina agua sub superficial, pero no toda se convierte en agua subterránea. Tres son los procesos fundamentales que tienen relación con esta agua. Primero que puede ser devuelta a la superficie por fuerzas capilares y evaporada hacia la atmósfera, para esto las condiciones de estructura y humedad del suelo deben permitir el ascenso capilar, para que se facilite el ascenso del agua por ellos, hacia las capas más superficiales formando finísimas columnas de agua. Cuando se dan condiciones de estructura y humedad como por ejemplo alta porosidad efectiva encontrada en suelos arenosos el agua no puede ascender y como consecuencia escurre a las partes inferiores (Oni.escuelas.edu.ar, 2012); el



segundo que puede ser absorbida por las raíces de las plantas que crecen en el suelo, ingresando de nuevo a la atmósfera a través del proceso de la transpiración; y el tercero, que esta sea infiltrada profundamente en el suelo obligada a descender por la fuerza de la gravedad hasta que alcance el nivel de la zona de saturación que constituye el depósito de agua subterránea.

Para el análisis de posibles zonas de recarga en la Subcuenca del Río Tarqui, emplearemos datos de precipitación que se encuentran disponibles en la base de datos del PROMAS, obtenidas de las estaciones meteorológicas ubicadas en o cerca de la Subcuenca para generar un mapa de precipitaciones, ubicando de esta forma los lugares con mayor o menor precipitación. Esto en conjunto con un mapa de pendientes generará zonas con mayor tendencia de escorrentía superficial o de infiltración.

2.2 Cuenca Hidrológica (Vintimilla & Vizhñay, 2009):

La cuenca hidrológica es la unidad morfológica drenada naturalmente por las aguas superficiales y subterráneas que fluyen hacia un colector principal, río, quebrada o lago.

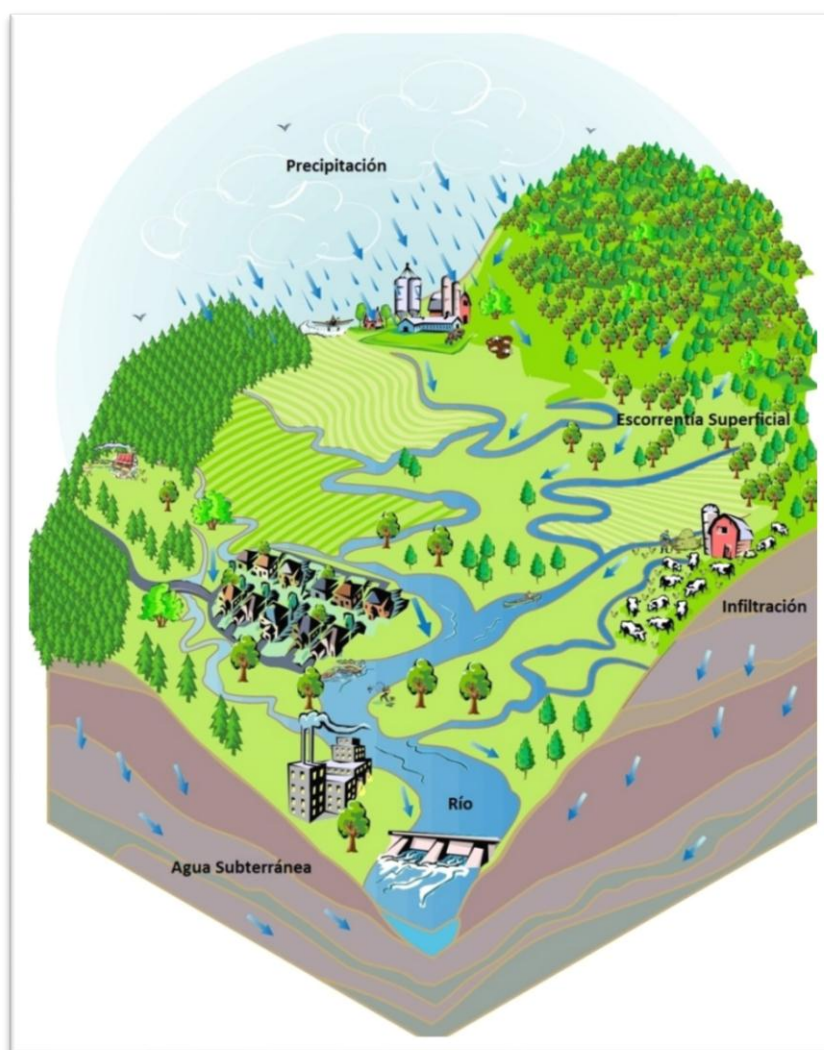
Está delimitada por una línea de cumbres ubicada entre 2 laderas adyacentes que divide las áreas de recepción de las precipitaciones hídricas desde la atmósfera y su flujo superficial. (Cisneros et al., 2011)

La cuenca hidrológica es un conjunto de relieves inclinados hacia un mismo curso de agua que recibe el escurrimiento superficial, el mismo que lo conduce hacia otro, y así, sucesivamente, de manera que la visualización más fácil y cercana a la realidad es bajo la forma de una red hidrográfica. Ver Ilustración 2-2. *En el área de estudio el colector principal es el Río Tarqui. Los principales ríos afluentes al Río Tarqui son los ríos Portete, Cumbe, Zhucay, Tutupali y San Agustín. Ver Ilustración 3-1*

Ilustración 2-2 Cuenca Hidrológica (Cathylaw.com, 2010)

2.2.1 Análisis Hidrológico de una Cuenca.

Se entiende por análisis hidrológico la evaluación cualitativa y cuantitativa de las relaciones entre pluviometría (agua meteórica o precipitación) y fluviometría (rendimiento hídrico superficial) de una determinada cuenca, y de los registros



que de ella se generaran, con el fin de determinar el recurso hídrico disponible.

En toda la cuenca hidrológica debe existir un balance entre la cantidad de agua que recibe la cuenca y la cantidad de agua que sale de ella. Partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y la evapotranspiración



mensual estimada podemos estudiar el balance de agua en el suelo a lo largo del año.

La ecuación de balance hídrico explica claramente lo antes mencionado, ya que dice que “para cualquier territorio durante cualquier periodo de tiempo la diferencia entre la entrada y la salida será casi igual al cambio de volumen de agua almacenada”. (Vintimilla & Vizhñay, 2009)

La ecuación del balance hídrico en su forma general es:

$$P = Q_s + ET + S_w$$

Dónde:

P = Precipitación media

Q_s = Escorrentía Superficial

ET = Evapotranspiración media

S_w = Escorrentía Subterránea

Balance Hídrico

El balance hídrico es una herramienta cuya finalidad es calcular el volumen total de agua en la cuenca y para evaluar la disponibilidad de recurso hídrico. El agua almacenada por el suelo depende del aporte que hace la lluvia y de la extracción que hacen las plantas a través de la evapotranspiración potencial (PET) de la cuenca. Partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la PET mensual estimada, podemos estudiar el balance del agua en el suelo. (Vintimilla & Vizhñay, 2009). La evapotranspiración, calculada en base al balance hídrico de la cuenca según (CG Paute (2012), es de 700 mm/año.

2.3 Agua Subterránea (Stephenson, 2003)

El agua subterránea es en muchos países una de las más importantes fuentes de suministro de agua para el consumo humano, agrícola y ganadero. Es igualmente un elemento vital para los ecosistemas que dependen de ella, como son los humedales. Un seguimiento regular y sistemático de este recurso subterráneo resulta indispensable en una gestión eficaz que puede dar respuesta a las necesidades hídricas del medio ambiente y de los ciudadanos. (International Groundwater Resources Assessment Center, 2006)

Tanto el agua subterránea como el agua superficial de cualquier región no constituyen recursos separados, sino que por el contrario, son parte del recurso hidráulico común. Es importante adicionar que los procesos suelen ser variables durante el tiempo, es decir que en diferentes épocas del año los ríos son fuentes de recarga, y otras pasan a recibir agua.

El agua superficial y el agua subterránea pueden relacionarse a través de:

- Arroyos y ríos de los que depende un acuífero como fuentes significativas de su recarga total.

- Ríos que a su vez dependen significativamente de la descarga de un acuífero para mantener su flujo en estiaje.

Las relaciones más comunes se presentan en la Ilustración 2-3.



Ilustración 2-3 Posibles Relaciones entre Agua Subterránea y Agua Superficial (Mate, 2006).

Más del 50% del agua de bebida en el mundo es la subterránea, porque es fiable, limpia y está en todas partes. Muchas extracciones también son realizadas para utilizar en agricultura y en la industria. En algunos proyectos como por ejemplo The Great Man Made River en Libia extraen agua a tazas demasiado altas, superando la capacidad de reposición, a esto se le conoce como minería de agua subterránea. (Stephenson, 2003)

Por evidencia topográfica e hidromorfológica, podría existir un acuífero en la parte baja de la cuenca del río Tarqui. (Guzman et al., 2012). Esto se respalda además con la información de los pozos del GPA. Como se verá 3.2.2 “Análisis de la información de los pozos del G.P.A.”. Los pozos realizados a mayor elevación y siendo al mismo tiempo los de mayor profundidad de perforación, fueron los que menor caudal dieron en la prueba de recuperación. Por lo tanto otro de los criterios a emplear para encontrar la ubicación de las zonas más aptas para encontrar acuíferos, será un mapa de elevaciones.

El usuario muy rara vez considera las consecuencias de utilizar el agua subterránea por ejemplo:

- Disminución del nivel freático
- Cambios en la ecología de la captación
- Acelerado incremento en la erosión del suelo
- Hundimientos de tierra
- Baja conductividad puede requerir varias perforaciones
- Empinamiento del nivel freático resultando en un flujo lateral más veloz
- Extracción de agua salina, contaminada u otro tipo de agua indeseable.
- Debido al lento movimiento de las aguas subterráneas, los cambios no son notados o solucionados fácilmente.

2.3.1 Tipos de acuíferos

Un acuífero es una formación geológica capaz de suministrar agua subterránea útil a pozos y manantiales. Todos los acuíferos tienen dos características

fundamentales: capacidad de almacenar agua subterránea y capacidad de permitir el flujo del agua subterránea. Pero el grado en que se presentan estas propiedades varía mucho de una formación geológica a otra y su magnitud puede variar con la estructura geológica. (Mate, 2006)

El acuífero está representado por formaciones geológicas de estructura permeable que se encuentran saturadas de agua, y con propiedades físicas que permiten el almacenamiento y el desplazamiento del agua a través de ella, y que es capaz de suministrar agua a pozos, galerías y manantiales, los que a su vez pueden ser empleados con algún fin beneficioso.

En ciertos acuíferos, el agua subterránea se manifiesta bajo condiciones *freáticas*, es decir, la zona saturada está expuesta a la presión atmosférica, como si estuviera contenida en un recipiente abierto. Otro término aplicado a estos tipos de acuíferos es *acuífero no confinado* o *agua subterránea libre* y cuando el agua se encuentra confinada por dos estratos impermeables, se le denomina *artesiano*. (Wheelabrator Clean Water Inc., 1975)

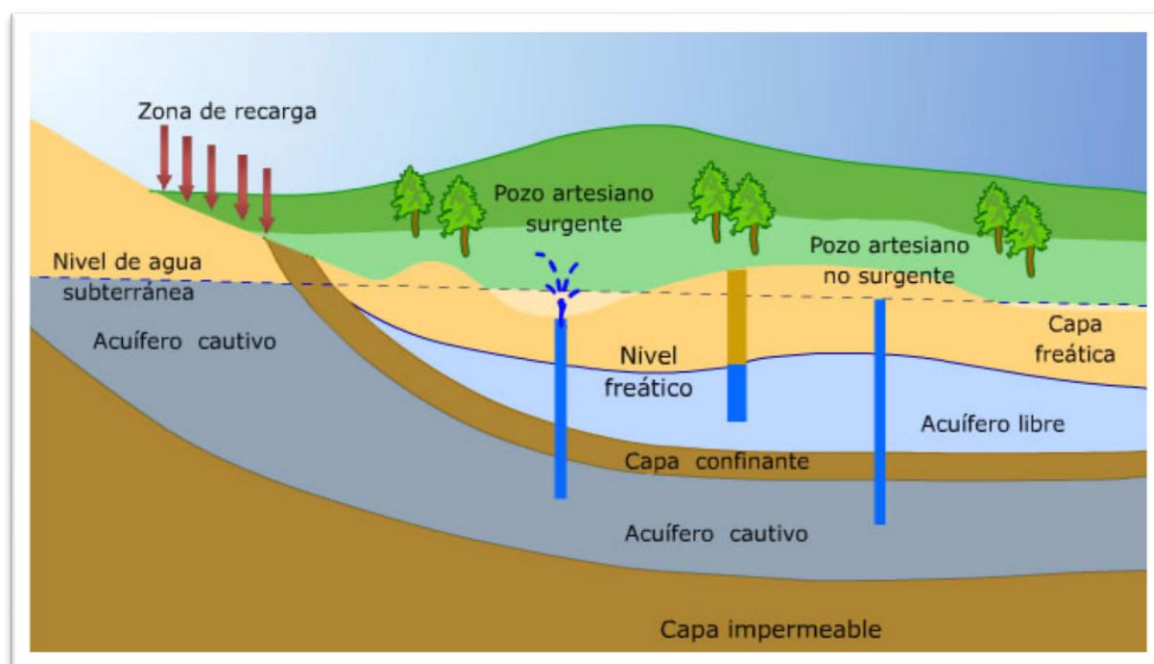


Ilustración 2-4 Tipos de Acuíferos (Explorock, 2012)

En el caso de los acuíferos freático, la presión hidrostática equivale a la profundidad que media desde la superficie libre del acuífero hasta un punto determinado dentro de él. De esta manera, cuando se perfora un pozo dentro de un acuífero freático, el nivel estático de agua dentro del pozo se halla a la misma elevación que el nivel freático, por lo que resulta ser de mayor interés para la construcción de galerías de filtración.

Cuando se perfora un pozo a través de un estrato confinante superior y se penetra dentro de un acuífero artesiano, el agua asciende por dentro del pozo hasta alcanzar algún nivel cuya elevación se halla por encima del techo del acuífero. La carga hidráulica expresada en metros de columna de agua, y para



cualquier punto del acuífero viene dada por la distancia vertical desde ese nivel al punto en cuestión. Algunas veces la presión hidrostática de un acuífero artesiano es suficientemente grande como para que el agua, dentro del pozo, se eleve por encima del nivel del terreno. En estas condiciones tiene lugar un *pozo surgente* como se puede ver en la Ilustración 2-4. (Wheellarbrator Clean Water Inc., 1975)

Un acuífero puede estar constituido por una o varias capas de grava, arena, piedras calizas cavernosas o un gran estrato de roca no porosa pero fracturada. Los mantos acuíferos pueden tener unos pocos metros de espesor o varios cientos de metros; estar situados superficialmente o a gran profundidad, ser de extensión pequeña o hasta de gran tamaño que abarca cientos de kilómetros cuadrados, pero en todo caso los acuíferos son de extensión limitada. (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2012)

2.3.2 Las Formaciones Geológicas como Acuíferos.

Se estudiarán los posibles materiales que conforman la litografía de las formaciones geológicas, desde un punto de vista de aptitud para la creación de acuíferos. En el análisis multicriterio a emplear para determinar las zonas más aptas para encontrar aguas subterráneas, se generará un “Mapa de caudal de recuperación de los pozos”, ver Ilustración 3-13, en función de las 4 pruebas de bombeo existentes, relacionando la litografía de los pozos del GPA con la litografía de las distintas formaciones que conforman la Subcuenca del río Tarqui.

La siguiente ilustración muestra el resultado de una prueba de bombeo escalonada, realizada al pozo de Acchayacu. Ilustración 2-5. Se realizan pruebas de bombeo con diferentes caudales. Cuando se llega a un caudal que rebase la capacidad a la cual el pozo se recupera (La grafica empieza a caer, a diferencia de los otros caudales donde la curva tiende a una línea horizontal), entonces se detiene la prueba, al caudal anterior a este se llama Caudal de Recuperación. 0,45 lt/seg en el ejemplo citado. En la sección de anexos se adjuntan las pruebas de bombeo de los 4 pozos del G.P.A.

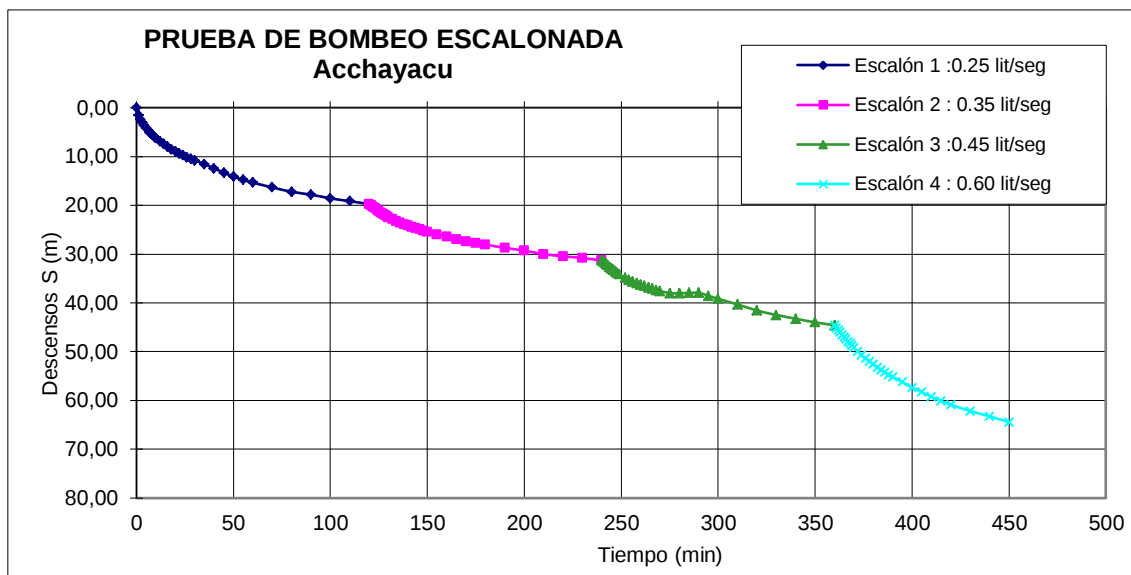


Ilustración 2-5 Prueba de Bombeo Escalonada del Pozo de Acchayacu

El agua subterránea tiene lugar tanto en materiales rocosos consolidados (roca dura) como en materiales sueltos no consolidados (roca suave). Cualquier tipo de roca sedimentaria, ígnea o metamórfica, ya sea consolidada o no consolidada puede constituir un acuífero si es suficientemente porosa y permeable. (Wheelerbrator Clean Water Inc., 1975)

Rocas sedimentarias.

Las rocas sedimentarias constituyen un cinco por ciento de la corteza terrestre, pero contienen alrededor del 95 por ciento del agua subterránea. Se hallan ampliamente distribuidas y son poseedoras de excelentes propiedades acuíferas. Los materiales que se han ido depositando como sedimentos, se derivan tanto de la meteorización como de la erosión de rocas preexistentes. La deposición puede tener lugar tanto en el océano como en la parte continental. Las formaciones sedimentarias incluyen tanto rocas duras como rocas suaves.

Un prototipo de roca sedimentaria dura es la caliza, constituida esencialmente por carbonato de calcio. La dolomita es una roca sedimentaria relacionada que contiene considerable cantidad de carbonato de calcio y magnesio. La mayoría de las calizas y dolomitas contienen muy poco o nada de aberturas conectadas cuando se acaban de formar como sedimentos marinos. Los movimientos tectónicos producen luego fracturas y fisuras (ver Ilustración 2-6), penetrando el agua hasta estas aberturas y bajo ciertas condiciones va disolviendo lentamente un poco de la roca. (Wheelerbrator Clean Water Inc., 1975)



Ilustración 2-6 Roca sedimentaria, Caliza fracturada (Universidad de Zaragoza, 2012)

La acción anterior agranda algunas de las aberturas hasta formar canales por disolución. Cuando estos canales hechos por disolución se llegan a desarrollar, estas rocas duras proporcionan grandes cantidades de agua a los pozos.

Las arenas y arcillas que han sido transportadas por los ríos hasta depositarlas en el océano, han llegado a desarrollar otras clases de rocas sedimentarias duras. Conforme capa tras capa de estas arenas y arcillas se fueron depositando, el peso de los materiales llegó a compactar las arenas y endureció las arcillas hasta transformarlas en lutitas. La deposición de materiales cementantes en los vacíos de las capas de arenas, durante y luego del proceso de compactación, las endureció hasta convertirlas en areniscas. Las lutitas y otros materiales similares denominadas limolitas, no constituyen buenos acuíferos. Pueden suministrar, en ciertas áreas, pequeñas cantidades de agua para pozo cuando han sufrido fracturas por movimientos tectónicos.

La arenisca indica una deposición cerca de la costa y en un ambiente marino. Esencialmente está constituida por sílice (cuarzo) que usualmente no tiene color. La amplia gama de colores visibles en las areniscas, se debe a los varios agentes que cementaron los granos para formar la roca dura. Su capacidad de ceder agua varía grandemente debido al grado de cementación. Las que rinden las mayores cantidades de agua son las areniscas parcialmente cementadas y fracturadas.

Las rocas sedimentarias suaves (Ver Ilustración 2-7) que constituyen acuíferos incluyen arena, grava y mezclas de ambas. Estas rocas granulares no consolidadas varían ampliamente de tamaño de partículas y grado de acomodo, con la consecuente gran variación de su capacidad de rendir agua. Consideradas globalmente son los mejores acuíferos. Estas rocas se hallan

ampliamente distribuidas y poseen buenas características de almacenamiento y transmisión de agua.

Otros acuíferos sedimentarios no consolidados, incluyen depósitos marinos, depósitos aluviales o fluviales, abanicos aluviales, acarreos glaciares y arenas de duna.

Los acuíferos que se han formado por depósitos aluviales o fluviales, son por lo general largos y angostos. Constituyen usualmente los materiales sub superficiales que se hallan por debajo del lecho del valle y en el valle del río propiamente dicho. Estos depósitos aluviales y fluviales se encuentran también en las terrazas situadas sobre el lecho del valle. Vienen a ser residuos escalonados de las épocas en que el río fluía de una elevación superior. También se encuentran esos depósitos aluviales y fluviales en valle abandonados cuyas corrientes cambiaron de curso. (Wheelerbrator Clean Water Inc., 1975)



Ilustración 2-7 Roca sedimentaria suave, Conglomerado (Tatoo, 2012)

Las propiedades acuíferas de las rocas sedimentarias están influidas por muchos factores. La meteorización es uno de los procesos importantes que incluyen tanto el proceso mecánico (desintegración) como el químico (descomposición). Si en la roca dura predomina la desintegración, el sedimento será de textura gruesa. Si el factor predominante es la descomposición, una gran parte del sedimento estará formado por limo y arcilla.

En los climas fríos y áridos y cuando las pendientes de los terrenos son pronunciadas, la desintegración pareciera ser el proceso de meteorización

principal. En cambio, la descomposición es más corriente en los climas calientes y húmedos en donde las pendientes del terreno son moderadas.

El tipo de la roca madre, la forma de transporte, la distancia de acarreo y el medio ambiente de deposición, son factores que en ciertos casos pueden ser más influyentes que la meteorización. Por ejemplo, la desintegración de la lutita produce sedimentos de grano fino debido a la naturaleza de la roca madre. Consecuentemente un depósito que se derive de la lutita, no será un buen acuífero. Como contraste, aquellos sedimentos que se deriven del granito o de otras rocas cristalinas, formarán buenos acuíferos de arena y grava. (Wheelerbrator Clean Water Inc., 1975)

Rocas Ígneas

Las rocas ígneas se forman cuando los materiales derretidos calientes (magma) que se originan a grandes profundidades dentro de la tierra, se enfrían y solidifican. El magma que fluye sobre o cerca de la superficie del terreno se denomina lava. Debido a su relativo rápido enfriamiento, la solidificación de las coladas de lava produce roca vidriosa y de textura fina.

Cuando los materiales derretidos se solidifican a grandes profundidades por debajo de la superficie del terreno, su enfriamiento es as lento y la roca que resulta es de textura gruesa. Estas últimas se denominan rocas intrusivas o plutónicas. Las rocas plutónicas no son porosas, pero en algunos lugares producen pequeñas cantidades de agua subterránea. La parte superior en donde el material ha sido meteorizado, contiene las únicas aberturas que éstas presentan, en forma de fisuras y fracturas. (Wheelerbrator Clean Water Inc., 1975)



Ilustración 2-8 Rocas Ígneas Intrusivas (Explorock, 2012)

Los materiales expulsados por una chimenea volcánica se conocen como rocas extrusivas o volcánicas. Se incluyen también en esta clase de rocas ígneas, las coladas solidificadas de lava y ceniza y escorias que son lanzadas en forma de materiales granulares.

La lava basáltica es una de las principales rocas volcánicas. Las aberturas que ésta contienen son por lo general grietas y fracturas. En algunas ocasiones se

han desarrollado rocas de alta porosidad debido a la formación de burbujas de aire conforme la lava se enfría. Los acuíferos basálticos contienen agua en sus fisuras, vesículas interconectadas (aberturas debido a burbujas de aire) y zonas brechosas de las sucesivas capas.

Las cenizas y las escorias, que son materiales fragmentarios eructados por los volcanes, se denominan piroclásticos dentro de la familia general de las rocas volcánicas. Estas partículas varían desde un polvo muy fino hasta grandes bloques. Los depósitos de ceniza y escoriáceos constituyen excelentes acuíferos. (Wheelerbrator Clean Water Inc., 1975)



Ilustración 2-9 Escoria volcánica (Universidad de Oviedo, 2012)

Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son aquellas que incluyen materiales sedimentarios e ígneos que a su vez han sido alterados por presión y por calentamiento. Bajo ciertas condiciones la arenisca se convierte en cuarcita; la lutita puede transformarse en pizarra y luego convertirse en esquistos de mica; el granito se vuelve gneis. Por lo general, estas rocas no son buenos acuíferos. Solamente se puede obtener alguna agua de las fracturas y grietas que se forman en la parte superior de la formación geológica en donde el material se ha meteorizado. La única excepción la constituye el mármol, que es una caliza que ha sufrido metamorfosis. Es un material mas duro que la caliza, pero cuando se fractura viene a constituir un buen acuífero, especialmente si se han desarrollado canales por disolución.

En la Tabla 1, se realiza un resumen de las propiedades acuíferas de las rocas, según sea el tipo de roca, el material perteneciente a cada grupo y su presencia en la Subcuenca del río Tarqui.



Ilustración 2-10 Roca metamórfica, Mármol. (Geosarmiento.blogspot.com, 2012)

Tipo de Roca	Material	Propiedades Acuíferas	Encontradas en la Cuenca
Sedimentarias	Caliza	Buenas, en presencia de fracturas y fisuras	No
	Dolomita	Buenas, en presencia de fracturas y fisuras	No
	Lutitas	Malas	Si
	Limolitas	Malas	Si
	Arenisca	Buenas	Si
	Arena	Excelentes, Considerados los mejores acuíferos	Si
	Grava	Excelentes, Considerados los mejores acuíferos	Si
	Limo	Malas	Si
	Arcillas	Malas	Si
Ígneas	Lava	Malas	No
	Ceniza Volcánica	Excelentes	Si
	Escoria Volcánica	Excelentes	Si
Metamórfica	Cuarcita	Malas	No
	Pizarra	Malas	No
	Mica	Malas	No
	Gneis	Malas	No
	Mármol	Buenas, en presencia de fracturas y fisuras	No

Tabla 1 Resumen de las Propiedades Acuíferas según el Tipo de Roca



2.3.3 Funciones de un acuífero

Dos son las funciones importantes de un acuífero, a saber: una función almacenadora y otra transmisora. Este almacena agua, sirviendo como depósito y transmite agua como lo hace un conducto.

Las aberturas o poros de una formación acuífera sirven tanto de espacio para almacenamiento como de red de conductos. El agua subterránea se mueve constantemente a través de distancias extensas y desde las áreas de recarga hacia las de descarga. El desplazamiento es muy lento, con velocidades que se miden en metros por día y a veces en metros por año. Como consecuencia de ello y del gran volumen que su porosidad representa, un acuífero retiene enormes cantidades de agua en almacenamiento inestable. (Wheelerbrator Clean Water Inc., 1975).

Las aberturas en las fracciones geológicas sub superficiales son de tres clases generales:

1. Aberturas comprendidas entre las partículas individuales, como en las formaciones constituidas por arena y grava.
2. Fisuras, disyunciones o fracturas en las rocas duras, y que se han desarrollado al quebrarse éstas.
3. Canales de disolución y cavernas en las calizas y aberturas resultantes de la contracción y de la evolución de los gases en las lavas.

Las dos propiedades de un acuífero que tienen relación con su capacidad de almacenar agua, son su porosidad y su rendimiento específico. La propiedad de una formación en lo referente a su función transmisora o de conducto, se denomina conductividad o coeficiente de permeabilidad.

Porosidad y rendimiento específico (Wheelerbrator Clean Water Inc., 1975)

La porosidad de un acuífero es aquella parte de su volumen que consiste de aberturas o poros, o sea, la proporción de su volumen no ocupada por material sólido. La porosidad es un índice que indica cuánta agua puede ser almacenada en el material saturado. La porosidad se expresa generalmente como un porcentaje del volumen bruto de material. Por ejemplo, si un metro cúbico de arena contiene 0.30 metros cúbicos de espacios abiertos o poros, se dice que su porosidad es de 30 por ciento.

Aunque la porosidad representa la cantidad de agua que un acuífero puede almacenar, no nos indica cuánta de aquella puede ceder. Cuando un material saturado drena agua mediante la fuerza de la gravedad únicamente cede una parte del volumen almacenado en él. La cantidad de agua que un volumen unitario del material deja escapar cuando se le drena por gravedad, se denomina *rendimiento específico*.

Aquella parte del agua que no se puede remover por drenaje gravitacional, es retenida, contra la fuerza de la gravedad, por capilaridad y atracción molecular. La cantidad de agua que un volumen unitario de material retiene cuando se somete a drenaje por gravedad se denomina *retención específica*.



Tanto el rendimiento específico, como la retención específica se expresan como fracciones decimales o porcentajes. El rendimiento específico sumado a la retención específica, es igual a la porosidad.

Si se drenan 0.10 metros cúbicos de agua de un metro cúbico de arena saturada, el rendimiento específico de ésta es de 0.10 o 10 por ciento. Si asumimos que la porosidad de la arena es de 30 por ciento, entonces su retención específica es de 0.20 o 20 por ciento.

Un acuífero freático que se extienda sobre un área de 50 kilómetros cuadrados con un espesor promedio de 10 metros, ocupa un volumen de 500 millones de metros cúbicos. Si su porosidad es de 25 por ciento este depósito de agua subterránea contendrá en sus poros 125 millones de metros cúbicos de agua subterránea. Si el rendimiento específico del material fuera de un 10 por ciento y se drenaran los 2 metros superiores del acuífero al abatir¹ este en una cantidad igual, el rendimiento total que este depósito daría sería de unos 2.5 millones de metros cúbicos. Esta cantidad de agua sería suficiente para alimentar a 4 pozos que se estuvieran bombeando a 15 litros por segundo continuamente durante 12 horas al día y a través de 965 días, lo que equivale a casi 3 años. Esta extracción por bombeo estaría garantizada por la cantidad de agua subterránea almacenada en los 2 metros superiores del acuífero con ausencia total de recarga durante ese periodo de tres años.

Este ejemplo tan sencillo nos muestra cómo la función de almacenamiento que desarrolla un acuífero hace posible la utilización de agua subterránea a razón constante aunque la recarga de aquel sea intermitente e irregular. En este aspecto, los depósitos subterráneos pueden resultar más eficientes que el embalse superficial dado su enorme capacidad.

Permeabilidad Intrínseca y Conductividad hidráulica

La Conductividad Hidráulica es una propiedad de los medios porosos que depende de la permeabilidad intrínseca, de la porosidad del medio y del grado de saturación que este tenga. Para evitar confusiones entre la Permeabilidad Intrínseca y la Conductividad Hidráulica, definiremos la Permeabilidad Intrínseca a continuación.

La permeabilidad intrínseca define la capacidad de un medio de transmitir un fluido y esta propiedad esta únicamente en función del medio por lo que es independiente de las propiedades del fluido. Y para evitar confusiones con la Conductividad Hidráulica, la cual incluye las propiedades del fluido (agua subterránea) se la expresa de la siguiente manera.

$$k = \frac{K\mu}{\rho g}$$

Donde k es la permeabilidad intrínseca, K es la conductividad hidráulica, μ es la viscosidad dinámica, ρ es la densidad del fluido, g la aceleración de la gravedad y esta variable tiene unidades de [M²].

¹ Se refiere a la reducción del nivel del agua en un pozo debido a una extracción sostenida. (Rivas, Angel, Molina, & Lopez, 2010)



Para trabajos prácticos en Hidrogeología, donde el agua es el fluido predominante, la Conductividad Hidráulica es la propiedad ocupada. Por lo tanto se puede decir que un medio tiene una unidad de conductividad hidráulica si este puede transmitir en una unidad de tiempo una unidad de volumen de agua subterránea a una viscosidad predominante a través de una sección transversal unitaria, medida en ángulo recto a la dirección del flujo, bajo una unidad de gradiente hidráulica. la Conductividad hidráulica está definida en las siguientes unidades [M.L-1] y se la formula mediante la siguiente expresión.

$$K = -v / \left(\frac{dh}{dl} \right)$$

Donde v corresponde a la velocidad de Darcy y dh/dl es el gradiente hidráulico definido por la diferencia de presiones en un tramo determinado. (M. L. Keith D., 2004)

En un suelo el agua que ocupa los espacios vacíos generalmente se encuentra distribuida en una serie de zonas verticales de humedad las cuales nos llevan a dar un diferente tratamiento a la variable conductividad hidráulica, definiéndose así 2 tipos:

Conductividad hidráulica en suelos totalmente saturados

El movimiento del agua en el suelo se controla por dos factores: la resistencia de la matriz del suelo para fluir agua, y las fuerzas que actúan en cada elemento o unidad de agua del suelo. La ley de Darcy, la ecuación fundamental que describe el movimiento de agua en el suelo, relaciona la proporción de flujo con estos dos factores. El flujo saturado ocurre cuando la presión del agua de poros es positiva; es decir, cuando el potencial matricial del suelo es el cero. En la mayoría de suelos esta situación tiene lugar cuando aproximadamente el 95% del espacio del poro total está lleno con agua. El restante 5% está lleno con el aire atrapado. (Donado, 2004)

Conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados

Esta Conductividad hidráulica ocurre sobre el nivel freático, donde los poros se encuentran parcialmente llenos de agua por lo que su contenido de agua es inferior a la porosidad y la presión del fluido es menor a la atmosférica. Entonces se puede decir que la ley de Darcy es válida para flujo de agua en medios parcialmente saturados, siempre y cuando se tenga en cuenta la dependencia de la conductividad hidráulica con el contenido de humedad.

Se ha venido realizando en paralelo una investigación sobre la conductividad hidráulica de la Subcuenca del Río Tarqui, cuyos resultados se puede consultar en el documento en revisión Barbecho & Calle (2012), el resultado de este trabajo ha sido la elaboración de un mapa de conductividad hidráulica, con esto se busca tener información sobre hidrogeología de la Subcuenca. El presente trabajo de investigación, así como el de Barbecho and Calle 2012, se ha basado en el trabajo realizado de recopilación y digitalización de toda la información existente tanto del Gobierno provincial del Azuay(G.P.A), PROMAS y l'm Gold S.A Ecuador. Además de basarnos en la información existente, realizamos



visitas de campo con el fin de validar la información obtenida, se estudiaron afloramientos geológicos, se conoció la Subcuenca en estudio y los puntos de monitoreo en ella existentes, ayudándonos de esta forma para tomar las mejores decisiones en el análisis de la información.

2.3.4 Recarga de Acuíferos.

La recarga se puede definir como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas, esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente de agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo. (Vélez Otálvaro, 2008)

Principales características de una zona de recarga:

- Desde el punto de vista Climatológico, son zonas con precipitación media anual, alta, evaporación media, baja, y humedad elevada.
- Desde el punto de vista geológico, son suelos permeables o medianamente permeables.
- Desde el punto de vista topográfico, son configuraciones planas o levemente onduladas.

En el análisis multicriterio a emplear, hemos descrito que se empleará desde el punto de vista climatológico un mapa de precipitación media anual, el valor de evapotranspiración es de 700 mm/año (CELEC EP, 2012) calculado en base al balance hídrico para la Subcuenca del río Tarqui, este dato es un valor general para toda la cuenca, se necesitaría varios valores dentro de la cuenca, por lo tanto no puede establecerse como criterio, por esto se ha decidido utilizar un mapa de uso del suelo, para emplearlo como criterio es indispensable asignar valores a los diversos usos del suelo según cómo pueden influir en la retención del agua. Este mapa fue proporcionado por la Unidad de geomática (2012). Dentro de este mapa de uso del suelo se contarán con zonas de páramo, bosques, zona urbana, etc. Para tomar en cuenta el punto de vista geológico se usará el mapa de conductividad obtenido del documento en revisión Barbecho & Calle (2012), y con respecto al punto de vista topográfico se usará un mapa de pendientes.

2.4 Red de Monitoreo.

2.4.1 Introducción

Para la protección y conservación de las aguas subterráneas se hace necesario una gestión técnicamente adecuada, que determine a través del tiempo y el espacio la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua. El proceso de implementación de una Red de Monitoreo, constituye una estrategia de supervisión continua del recurso, que permitirá tomar decisiones más acertadas en la planeación y diseño de políticas de manejo de este recurso.



Para evaluar aspectos importantes del agua subterránea y poder implementar soluciones de gestión se requieren datos hidrogeológicos, tanto de la “condición básica inicial” como de las “variaciones en el tiempo” (Tabla 2). (Mate, 2002)

Tipo de Datos	Información Básica Inicial (Teórica)	Datos Variantes en el Tiempo (De Campo)
Ocurrencia del Agua Subterránea y Propiedades del Acuífero	• Perfiles hidrogeológicos • Niveles y Calidad instantánea de agua subterránea. • Pruebas de bombero en pozos y acuíferos.	• Monitoreo del nivel de agua subterránea • Monitoreo de la calidad del agua
Uso del Agua Subterránea	• Instalaciones de bombero de pozos • Inventarios de los usos del agua • Registros y pronósticos de población • Consumo de energía para riego	• Monitoreo de la extracción de pozos (directo o indirecto) • Variaciones del nivel del agua subterránea en los pozos.
Información de Apoyo	• Datos climáticos • Inventarios de uso del suelo • Mapas y secciones geológicas	• Medición de flujo en los ríos • Observaciones meteorológicas • Levantamiento con satélite del uso del suelo.

Tabla 2 Tipos de Datos que se Requieren en la Gestión de Aguas Subterráneas. (Mate, 2002)

2.4.2 Estudios de exploración y evaluación hidrogeológica.

En estos estudios se identifican, delimitan y caracterizan las estructuras hidrogeológicas y se estiman a nivel de pronóstico, los recursos y reservas de aguas subterráneas. Los resultados de estos estudios, permiten definir las áreas con mayor potencial para el aprovechamiento del agua subterránea.(INGEOMINAS, 2004)

Lo que generalmente se considera como el “Monitoreo de Agua Subterránea” contempla la recolección, análisis y almacenamiento de datos de forma regular, conforme a la circunstancias y a los objetivos. El monitoreo dependerá del aspecto de gestión que trate, disponibilidad de recursos e incluso del factor económico que se disponga. En la Tabla 3 se muestran los estudios que deben realizarse así como procedimientos, fase del proyecto donde tiene lugar y resultados.

Estudios de Exploración y Evaluación Hidrogeológica				
	Fase del Proyecto	Procedimiento	Resultados	Comentarios



Reconocimiento o Hidrogeológico	Anteproyecto, Planificación y Diseño.	<i>Recolección y validación de Datos para la Elaboración de Mapas:</i> Litografía, Geomorfología, Conductividad, Ojos de Agua, Manantiales, Vegetación, Usos de Suelo, clima.	Encontrar las zonas más probables donde pueden existir acuíferos, o zonas de recarga.	Se ha realizado un inventario de puntos de monitoreo dentro de la cuenca (Ilustración 1-7).
			Caracterizar y Clasificar las unidades geológicas y determinar características hidrogeológicas. Diseño y Desarrollo de la red de monitoreo para obtener el modelo conceptual.	Tomando pruebas de bombeo de los pozos existentes se ha elaborado un "Mapa de Recarga de Acuíferos" (Ilustración 4-1)
Exploración Geofísica	Desarrollo, Estudios Preliminares.	Ensayos de resistividad eléctrica, gravimetría, sísmica, magnetometría, electromagnetismo, registros geofísicos de pozos y/o nuevas técnicas de resonancia nuclear	Correlación con la Geología, Determinación de la presencia de agua subterránea (nivel de Profundidad), porosidad y fracturación de la roca, espesor de la zona no saturada, reservorios geotérmicos y aguas termales y la geometría de acuíferos o zonas acuíferas.	Elaboración de mapas donde se ubiquen las zonas más idóneas para los puntos de monitoreo (Ilustración 4-5)
			Confirmación del Modelo Conceptual. Y ubicación de perforaciones exploratorias	Definir los Puntos de Monitoreo basado en estos análisis

Perforaciones Exploratorias	Ejecución	Perforación de pozos de exploración y de extracción según sea la necesidad. Elaborar ensayos eléctricos en el interior de la perforación y obtener testigos de los estratos perforados	Validación de la Exploración Geofísica y de los modelos geológicos, geofísicos e hidrológicos obtenidos en fases anteriores	Después de los resultados de la exploración geofísica, se ha confirmado la necesidad de perforaciones y la ubicación de los mismos
			Caracterización de los acuíferos desde el punto de vista hidráulico y químico.	Ubicación y Determinación de estaciones de estudio climatológico
Evaluación Hidrodinámica y Caracterización Hidrogeológica	Monitoreo	Pruebas de Bombeo (la duración y ubicación son determinadas a partir de los estudios previos)	Estudio del movimiento del agua a través de rocas y sedimentos desde las zonas de recarga hacia las de descarga (presión piezométrica, gradiente, conductividad hidráulica, transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento)	Esta fase se confirmará los modelos planteados anteriormente y se dará un seguimiento al funcionamiento del acuífero
		Determinación de la calidad del agua para determinar sus usos mediante análisis físicoquímicos e isotópicos.	Identificación de zonas de Recarga y Descarga, Dirección del Flujo Subterráneo, Origen del agua subterránea (interconexiones de diferente origen, entre acuíferos), tiempo de residencia.	Se tomarán muestras de calidad de agua del mismo, y se podrá determinar posibles puntos de contaminación o influencia sobre el acuífero

Tabla 3 Estudios de Exploración y Evaluación Hidrogeológica

2.4.3 Tipos de Redes de Monitoreo.

Una **red de monitoreo** está formada normalmente por un conjunto de pozos de observación acoplado con una selección de pozos de extracción. Los sistemas y redes de monitoreo se clasifican en 3 grupos principales. **Los Sistemas**



Primarios sirven para detectar cambios generales en el flujo del agua subterránea y sus tendencias de calidad, con objeto de aportar el conocimiento científico necesario para entender el recurso de agua subterránea. **Los Sistemas Secundarios y Terciarios** son para evaluar y controlar el impacto de “riesgos específicos” del agua subterránea. (Mate, 2006)

La creación de un Sistema Primario es la de mayor interés en esta investigación, ya que su función básica es la evaluación del comportamiento general del agua subterránea.

Frecuentemente se considera que el monitoreo del agua subterránea es caro. Las principales componentes de sus costos incluyen las de inversión (instalación de la red), el costo del muestreo (de personal, instrumentación y logística) y los costos de análisis (de laboratorio y procesamiento y almacenamiento de datos). A pesar de que es poco probable que los beneficios de la inversión inicial resulten evidentes de inmediato, a la larga el beneficio puede ser sustancial si el monitoreo forma parte integral de un proceso de gestión y evita que:

- Se pierdan valiosas fuentes de agua subterránea
- Tengan que introducirse tratamientos costosos
- Se requiera un proceso costoso de remediación del acuífero.

La eficacia del monitoreo del agua subterránea se puede aumentar considerablemente si, además de poner atención en el diseño de la red, la implementación del sistema y la interpretación de datos, también:

- Se utilizan los datos obtenidos en actividades previas de monitoreo de la mejor manera posible
- Se seleccionan los sitios de monitoreo para que en la medida de lo posible sean de fácil acceso
- Se utilizan parámetros indicadores al máximo con objeto de reducir los costos de los análisis
- Se promueve que los usuarios realicen un auto-monitoreo complementario
- Se incorporan procedimientos de control y aseguramiento de calidad.

2.4.4 Clasificación de Pozos de Monitoreo.

A continuación se describen dos tipos básicos de pozos (Ilustración 2-11) que son el núcleo para cualquier proyecto de investigación y monitoreo de agua subterránea. Dichos pozos constituyen perforaciones clave para observar los acuíferos, y sirven para efectuar mediciones de presión y calidad del agua subterránea que proporcionan información para diagnosticar la salud del sistema acuífero. (Mate, 2006).

Pozos de Producción: Además de perforarse para abastecimiento, se busca obtener datos in situ sobre el recurso de agua subterránea que no pueden volver a obtenerse. El perfil geológico y la prueba inicial de



bombeo son la información básica de referencia sobre la calidad y cantidad de agua subterránea, además de ser datos valiosos para determinar el potencial de la extracción de los pozos. (Mate, 2006).

Este tipo de pozo es el caso de los pozos perforados por el Gobierno Provincial del Azuay. Normalmente es más difícil interpretar los datos obtenidos de pozos cuando ya están en operación, esto se ha traducido en una pérdida de información en lo que se refiere a testigos de geología, probablemente porque los fines por los cuales se iniciaron las perforaciones no eran investigativos. Sin embargo, se utilizaron las pruebas de bombeo para establecer un criterio (Ver 3.2.2.4) que nos ayude a determinar zonas de posibles acuíferos.

Pozos de Observación: Es el caso de estaciones orientadas al monitoreo, son ubicadas y diseñadas para detectar cambios potenciales de flujo y calidad del agua subterránea. Sus parámetros de diseño incluyen profundidad de la rejilla de entrada, frecuencia de mediciones (caso de no ser continuas) y parámetros de calidad seleccionados. (Mate, 2006).

Los Pozos de Observación son los tipos de pozos que mayor interés tienen en nuestro aporte, en vista de que son exclusivos para monitoreo, son económicamente más accesibles, requieren menos trabajo de campo y menor tiempo de construcción. En el área de estudio no existen este tipo de pozos, como resultado de este trabajo se analizará la ubicación de una red de pozos de observación.

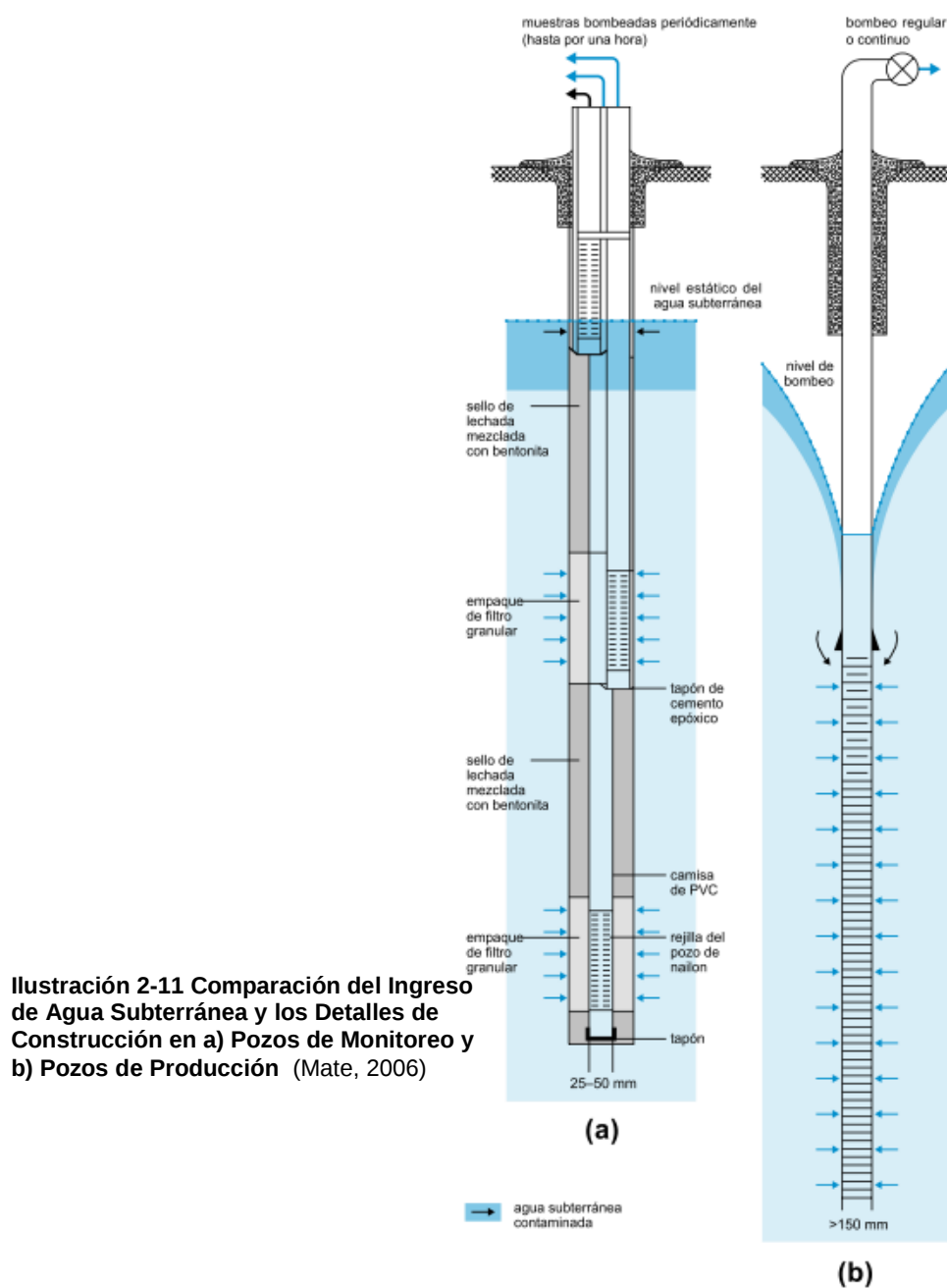


Ilustración 2-11 Comparación del Ingreso de Agua Subterránea y los Detalles de Construcción en a) Pozos de Monitoreo y b) Pozos de Producción (Mate, 2006)



2.4.5 Uso de Sensores Remotos.

Los sensores en satélite o avión pueden proporcionar mediciones objetivas en áreas regadas a escalas potencialmente grandes, con una cobertura casi continua y a bajo costo por km².

Comúnmente se emplean para el mapeo de geología cuaternaria, usos del suelo, tipos de cultivos, ensalitramiento del suelo y asentamientos del terreno. Recientemente esta técnica se ha complementado con la interpretación de datos de sensores de energía termina para estimar las tasas de evaporación real. Si se cuenta con imágenes adecuadas, con la frecuencia suficiente y el relieve de la superficie del suelo no es muy abrupto, entonces puede determinarse la evaporación real diaria y total en estiaje a nivel de parcela y acuífero, lo cual puede servir para verificar los datos sobre el uso del agua subterránea y precisar en donde conviene hacer una inspección de campo. Las imágenes requeridas pueden obtenerse de satélites comerciales como LandSat, que obtienen imágenes de alta resolución pero pasan por el mismo sitio solamente cada 16 días y pueden no generar suficientes conjuntos de datos en regiones frecuentemente nubladas. O también podría obtenerse de satélites meteorológicos especializados, que pasan más frecuentemente, pero las imágenes que generan pueden no siempre tener la resolución adecuada. (Mate, 2002)

Se ha visto que el uso de tecnología de sensores remotos puede colaborar sustancialmente a la implementación de la red, por este motivo y aprovechando que el PROMAS está en proceso de adquisición de un “Avión No Tripulado” (UAV) para la unidad de Geomática, con capacidad de capturar imágenes multiespectrales (hasta Infrarrojo Cercano) y RGB con resoluciones de hasta 5cm el pixel, se podrá a futuro aproximar de mejor manera los valores de evapotranspiración de la cuenca (una de las hipótesis planteada era que la evapotranspiración es mucho mayor a la calculada, además esto ayudara a establecer un balance hídrico más confiable) a más de poder elaborar mapas con mayor detalle y precisión de la Subcuenca, como mapas de clasificación de uso del suelo, que se utilizara como criterio para la determinación de zonas de recarga, y posible ubicación de acuíferos. El mapa a emplear en este documento, es producto de la reclasificación de una imagen satelital, de baja resolución. Con una imagen aérea de mejor resolución, como la que se puede obtener con esta tecnología, los datos serán más exactos y validaran la información aquí expuesta.

2.4.6 Estado de la red de Monitoreo

De la propuesta integral de monitoreo realizada por (Guzman & Iñiguez 2011), se han realizado las siguientes actividades a partir del mes de febrero del 2012.

Pozos de Extracción (G.P.A.): En todos los pozos del G.P.A. se han instalado sensores Baro – Divers para generar información sobre la fluctuación del nivel del pozo. La toma de datos se realiza continuamente, aun cuando el pozo está siendo bombeado por la comunidad. Esto representa un inconveniente en la recopilación de datos. En primer lugar únicamente los pozos de Chilcatotora y Morascale cuentan con medidores de caudal en sus instalaciones, mientras los

pozos de Gullanzhapa y Acchayacu, no disponen de ningún medio para verificar el caudal extraído. En segundo lugar, los Diver colocados en los pozos tienen una capacidad para medir variaciones de nivel de 10 metros, pero los pozos al ser bombeados bajan mucho más su nivel.

Estación Meteorológica: Cerca del pozo de Morascalle, se ha instalado una estación meteorológica Davis, la misma lleva un registro de la precipitación, intensidad y dirección del viento, radiación UV, y temperatura. Esta estación complementará la red de monitoreo, mejorando el set de datos en cuanto a hidrometeorología de la cuenca.

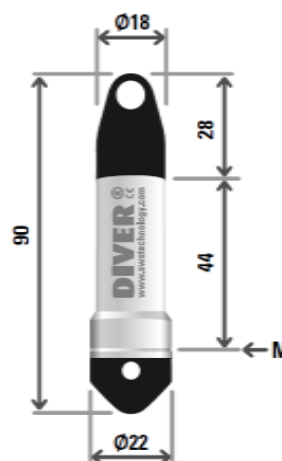
2.4.7 Equipo de Monitoreo Utilizado.

Actualmente, en los sitios de monitoreo descritos anteriormente, se emplean los siguientes equipos para recopilar la información necesaria para tener una base de datos e información. A continuación se hará una breve descripción técnica de cada equipo, y se dará un valor aproximado en el mercado.

Schlumberger Baro-Diver: Estos equipos proporcionan una medición fiable, además de establecer un registro automático de niveles de aguas subterráneas y los datos de temperatura. Los sensores tienen 22 mm de diámetro y 90 mm de longitud, por su tamaño pueden ser instalados en prácticamente cualquier pozo, sin tener ninguna interferencia con el trabajo del mismo.

Para cada medición el Baro-Diver registra simultáneamente la presión barométrica, la temperatura de las aguas subterráneas, la fecha y la hora. Estos equipos innovadores tienen una memoria interna capaz de almacenar hasta 24.000 mediciones por parámetro. Esto es esencialmente una medición cada diez minutos durante seis meses.

Su instalación es fácil y puede realizarse casi en cualquier lado, el costo es efectivo considerando los largos periodos de medición y la obtención de datos confiable y precisa, además de no requerir mantenimiento ni calibración.





Dependiendo el modelo, los Diver pueden medir presiones de 10, 20, 50 y hasta 100 metros, con una precisión inferior a 5 cmH₂O, y temperaturas de -20 a +80 °C con precisiones de hasta 0,1 °C.

En las siguientes ilustraciones se muestran los sitios en donde hemos instalado estos sensores, como puede observarse, se pueden ubicar tanto en pozos profundos, como en ríos, o vertederos.

Según la página de internet “Stevens Water Monitoring Systems” (1911) los sensores Diver tienen un precio que va desde los \$395.00 hasta los \$795.00.

Davis – Vantage Pro 2™: Es el tope de gama de las estaciones meteorológicas de Davis Instruments. El modelo Plus incorpora sensores de radiación solar y UV, gracias a los cuales pueden calcularse diversas variables meteorológicas adicionales. El

Ilustración 2-12 Aplicación de Schlumberger Baro-Diver

alimenta la batería interna y al ventilador que garantiza una máxima precisión y fiabilidad, así como protección solar y reducción de los efectos de radiación de temperatura y humedad.

Se cuenta con una consola inalámbrica que permite visualizar todas las



variables meteorológicas simultáneamente y configurar la estación sin necesidad de un ordenador. Las variables meteorológicas que es capaz de medir esta estación son:

- Velocidad y dirección del viento.
- Temperatura y humedad interior y exterior.





- Temperatura de sensación y punto de rocío.
- Lluvia actual y acumulada diaria, mensual y anual.
- Intensidad de lluvia.
- Presión atmosférica actual y tendencia.
- Radiación solar.
- Evapotranspiración.
- Radiación e índice UV.
- Pronóstico meteorológico.
- Fase lunar y hora de puesta y salida de sol.

Con más de 80 gráficos diferentes, en la propia consola se pueden ver datos de las últimas 24 horas, días o meses. Y más de 100 mensajes diferentes muestran detalles adicionales de pronóstico y de las condiciones actuales.

Se ha adicionado un Datalogger para almacenamiento de datos con un intervalo de archivo desde 1 hasta 120 minutos y almacenamiento de datos.(TermoMed.net, 2011)

Se ha instalado una estación de este tipo en el sector de Morascale, a continuación podemos ver las fotografías, el objetivo de esta es generar una base de datos de la precipitación y la evapotranspiración en esa zona de la cuenca, con el fin de cruzar dicha información con la de escorrentía y los sensores subterráneos.

Según la página (MSMComunicaciones.com, 2012) se pueden adquirir estas estaciones meteorológicas en sus versiones cableadas o inalámbricas, con



sensores solares y UV y en su versión PLUS, desde \$700.00 hasta \$1,700.00.

OYO – Geologger Three: El Geologger ha sido diseñado para proveer datos de una ejecución simultánea de Gamma Natural y Registros Eléctricos. Es de gran utilidad porque con el registro de Gamma Natural y Eléctricos, se puede determinar capas de suelo permeables como gravas y arenas, con altos porcentajes de porosidad, y capas impermeables como la arcilla. La porosidad está representada por la intensidad de la resistividad. La Impermeabilidad se relaciona muy cercanamente con el volumen de arcilla que contiene un estrato de suelo, y a mayor contenido de potasio en la arcilla, mayor será la intensidad de los rayos Gamma Natural.



Los elementos de medición son cuatro, compuestos de Resistividad Normal de 16" y 64" de espacio, SP y Rayos Gamma Natural en cada registro.

Debido a la falta de testigos en los pozos del G.P.A, en la investigación (Barbecho & Calle, 2012), se ha partido de los registros eléctricos proporcionados por el G.P.A para determinar los posibles estratos presentes en los pozos. A partir de los resultados obtenidos en dicha investigación hemos podido realizar una comparación de la litología de dichos pozos con otras zonas presentes en la cuenca, para extrapolar los valores de las pruebas de bombeo y generar un "Mapa de Caudal de Recuperación".

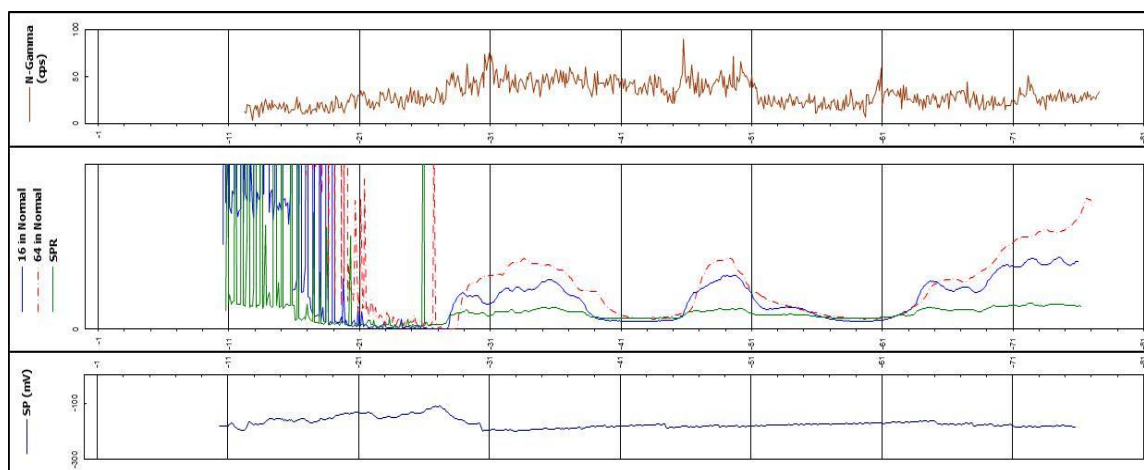


Ilustración 2-14 Datos del Sondeo de Geologger Three

En la Ilustración 2-14 podemos observar como es el resultado de los datos tomados en un registro. Estos se pueden tomar impresos o en forma digital como un set de datos en una hoja de cálculo. De esta forma se puede trabajar libremente con la información obtenida, como se podrá ver en los anexos. A ser este equipo demasiado antiguo, no podemos establecer un costo aproximado del mismo



Ilustración 2-15 Aplicación de Geologger Three

3. Materiales y Métodos:

3.1 Área de Estudio.

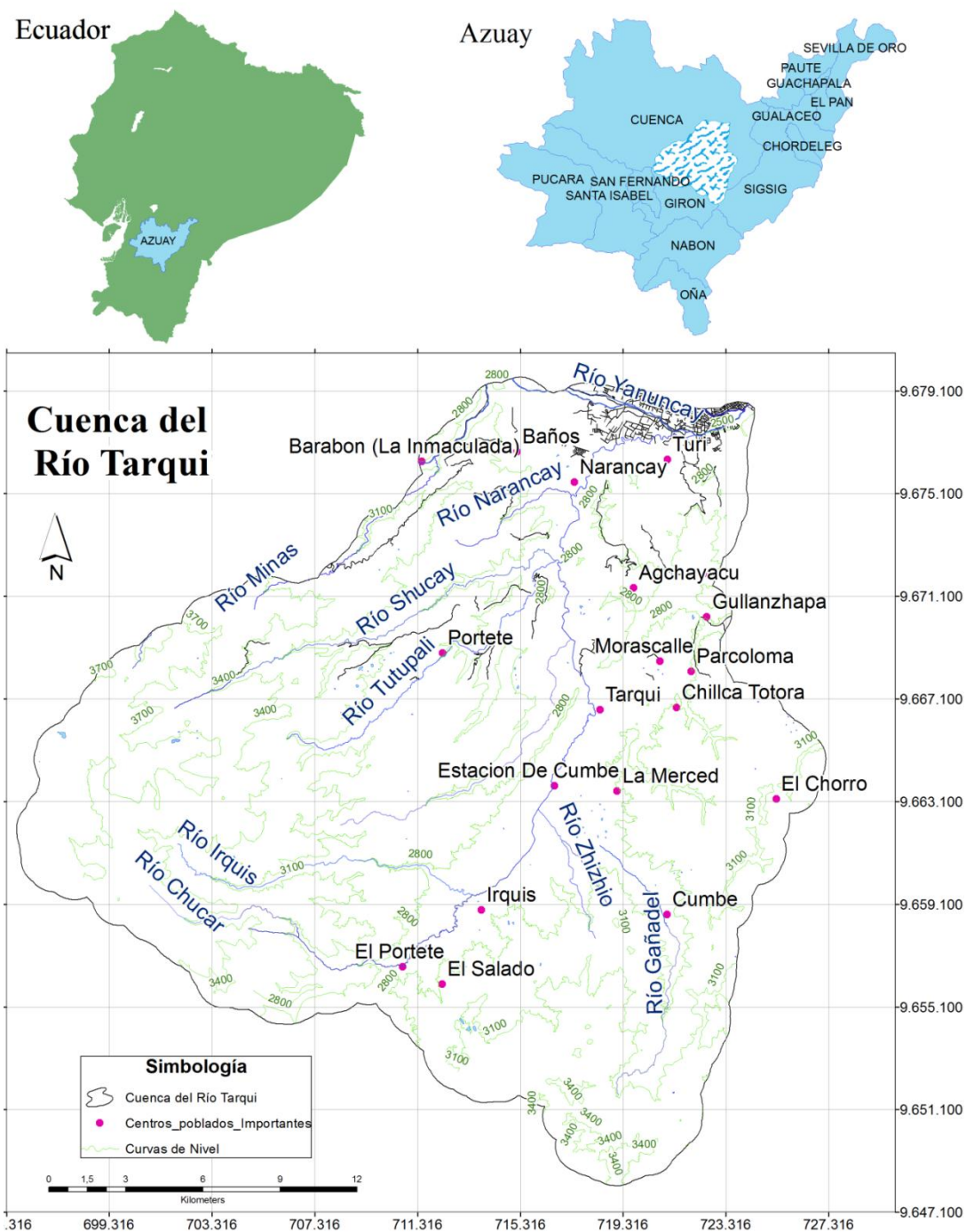


Ilustración 3-1 Ubicación de la Sub Cuenca del Río Tarqui



3.1.1 Descripción del Área de Estudio

El área de estudio, la Subcuenca del Río Tarqui, está localizada 3km al sur de la ciudad de Cuenca, capital de la provincia del Azuay y tercera ciudad más grande del Ecuador. Ver Ilustración 3-1. Es una llanura de topografía regular, rodeada de pequeñas elevaciones, que en conjunto forman pequeñas cordilleras de baja llanura.

El sitio se encuentra en la zona WGS84 17 Sur, cubriendo un área aproximada a 476,30 km². La topografía de la Cuenca alcanza una altura de 3.700 m sobre el nivel del mar en su parte oeste, y en el centro de la cuenca se encuentra su punto más bajo 2.600 m sobre el nivel del mar, donde fluye su cauce principal el Río Tarqui.

El Río Tarqui es un afluente del Río Paute, que es parte de la cuenca del Río Amazonas drenaje sur de los Andes ecuatorianos (Vanacker, et al., 2007). El río se origina en la parte alta del área montañosa del oeste y surestes de la cuenca, fluye a través del valle en su parte central hacia el noreste, antes de unirse con el Río Yanuncay. Los principales ríos afluentes al Río Tarqui son los ríos Portete, Cumbe, Zhucay, Tutupali y San Agustín.

La región se caracteriza por un régimen de precipitación bimodal, con un patrón de distribución espacial altamente heterogéneo (Pericles, 2009). Según la base de datos del PROMAS, el rango medio de precipitaciones es de 900 mm anuales en la depresión central de la cuenca, hasta cerca de 1.175mm mm en las zonas más altas.

El clima de la zona es el característico de zonas alto andinas, con bajas temperaturas durante gran parte del año, heladas durante la noche y neblina (ETAPA, 2011). Las épocas secas más largas se extienden entre junio y agosto, mientras que entre enero y febrero existen sequías de menor duración. El régimen de humedad está entre húmedo a sub-húmedo (Vanacker et al., 2007). Según Pericles (2009) la temperatura promedio diario en la cuenca es de 7°C. Esta información contrasta con los datos de la estación meteorológica ubicada en el sector de Morascale, tomados desde el mes de abril del 2012 hasta la fecha que muestra un promedio de 12°C.

La geología de la cuenca, consiste principalmente en rocas consolidadas sedimentarias y volcánicas de las eras Mioceno Superior y Pleistoceno Inferior y sedimentos no consolidados fluviales y glaciares del Pleistoceno Inferior hasta la época actual. (Vanacker et al., 2007). El uso del suelo es eminentemente agrícola y ganadero, existen numerosas haciendas lecheras, con grandes extensiones de potreros para el mantenimiento del ganado vacuno. En la cuenca del río Tarqui se hallan las Áreas de Bosque y Vegetación Protectora de: Yunga Totorillas, Yanuncay Irquis y Sunsun Yanasacha. (ETAPA, 2011)

Debido a la altura de su ubicación, el clima varía de templado a frío. La alta posición del sol, la poca variación de la temperatura promedio mensual en el transcurso del año, y la alternancia estacional de épocas de lluvia y sequía es



típica de esta zona. Las diferentes estaciones del año se diferencian no tanto por las temperaturas sino por la presencia de lluvias.

Dentro del área, las variaciones regionales del clima se deben, en primer lugar, a diferencias de altura. A mayor altura hay un incremento general de la precipitación, la humedad relativa del aire y la velocidad del viento, en cambio hay una disminución de la temperatura, presión atmosférica, presión de vapor y la evapotranspiración. (Coronel, 2005)

3.1.2 Hidrogeología de la Subcuenca del Río Tarqui

La información hidrogeológica en la región es bastante limitada, según Coronel (2005), la cuenca en estudio cuenta con presencia de agua subterránea solo en determinados lugares. Vale mencionar que la información en la cual se basa es un mapa hidrogeológico a nivel nacional, el mismo determinado mediante análisis de pozos poco profundos, o vertientes de agua superficial, por lo tanto, la información mencionada es poco confiable.

Una de las formaciones geológicas presentes en la Subcuenca es la Formación Tarqui, se la puede encontrar en elevaciones comprendidas entre 2.660 y 2.820 m. La misma puede presentar Tobas, Aglomerados y Andesitas. Según la información proporcionada en la tesis de maestría del Ing. Coronel, apoyada en mapas geológicos del IGM. En la Ilustración 3-2 se puede ver que a formación Tarqui, en contraste con la Ilustración 3-12, le corresponde la zona con mayores valores de conductividad, por sus características granulométricas, puede tener una recarga significativa en los acuíferos.

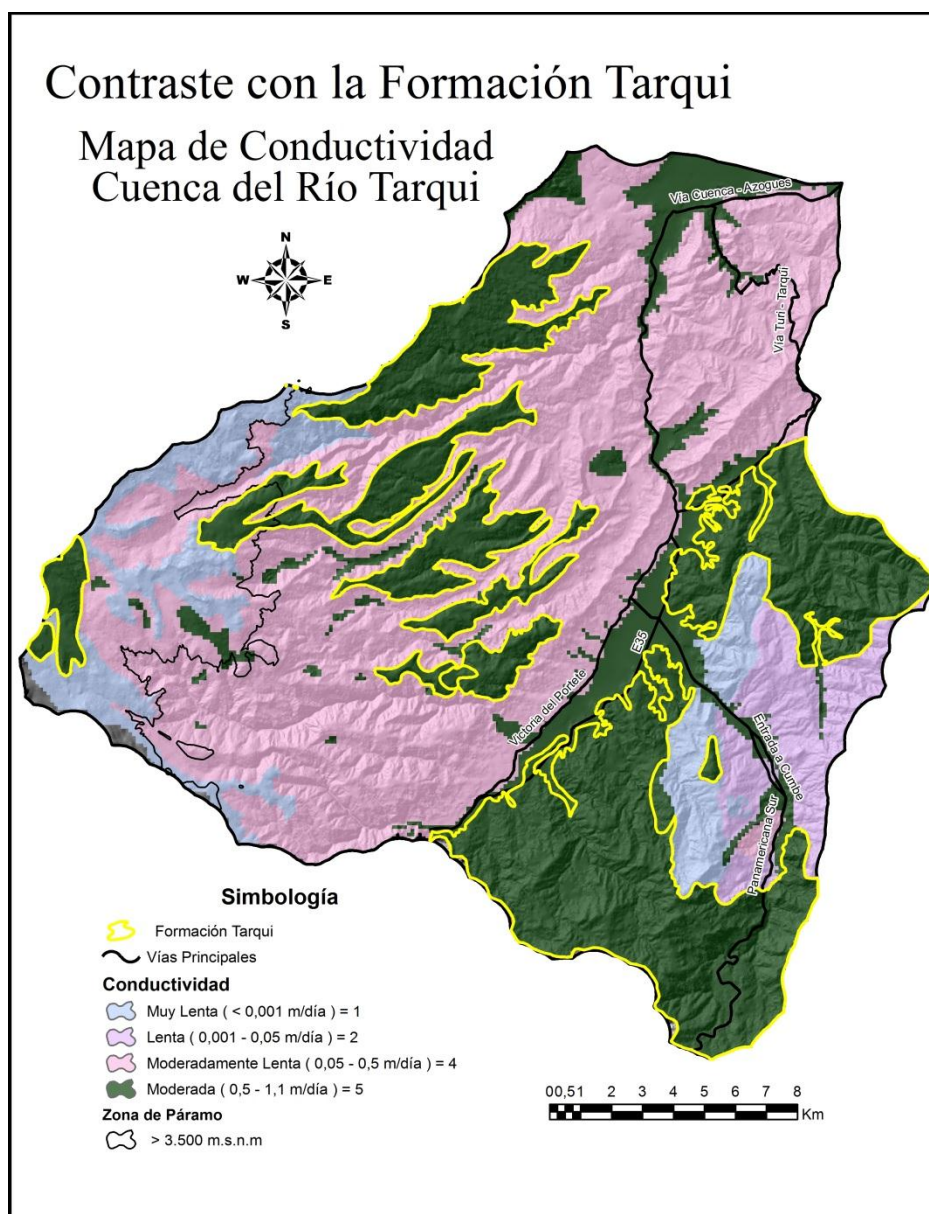


Ilustración 3-2 Contraste de la Formación Tarqui con la Conductividad

En cotas inferiores a 2.660 m. se observa formaciones del grupo Ayancay (lutitas, arcillas, areniscas, conglomerados basales) que pueden tener potencias hasta de 2.000 m. Hacia esta zona fluye el agua de la cuenca, ya que es donde se produce sus cotas más bajas, sin embargo al no tener mayores pendientes, resultan encharcamientos en superficie. La infiltración es lenta, dejando al agua en zona vadosa por mucho tiempo antes de que esta sea infiltrada a los acuíferos, de ahí que muchas haciendas tienen pozos artesanales para consumo doméstico, con producciones de hasta 0,5 lt/s a poca profundidad. (Coronel, 2005)

La historia y procesos geológicos que han tenido lugar en una región determinada son los que han establecido la localización y espesor de las formaciones acuíferas que hoy día encontramos bajo la superficie. El agua subterránea tiene lugar dentro de un marco geológico. Así pues, para poder aplicar los procedimientos más prácticos y económicos de obtención de agua



subterránea de los varios acuíferos arenosos y rocosos, se requiere un adecuado conocimiento de geología. (Wheelerbrator Clean Water Inc., 1975)

La información geológica existente consta de:

- Mapa Geológico de Cuenca. Escala 1:100.000 (Britanica. & Minas, 1973)
- Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 3° - 4° S. Escala 1:200.000 (CODIGEM, 1997)
- Mapa Geológico de la Sub Cuenca del Río Tarqui, proporcionado por (Geomática & PROMAS, 2012) en formato digital

Adicionalmente se realizaron salidas de campo, en la cual se tomaron muestras de las formaciones. Con la participación de la Facultad de Ingeniería a través de la Ingeniera Geóloga Marta Roura, se estudiaron las muestras encontradas comparándolas con sus respectivas formaciones de acuerdo al mapa geológico. Con esto se logró establecer en escala 1:1 los tipos de material que constan dentro de la cuenca en las distintas formaciones geológicas

La información proporcionada por el PROMAS se empleó para la determinación de las formaciones presentes en la cuenca, los mapas geológicos nos sirvieron para ubicar estructuras geológicas, y las salidas al campo para contrastar la información geológica de los mapas con la que se tiene en campo.

En la Ilustración 3-3 se presenta el Mapa Geológico de la Subcuenca proporcionado por el PROMAS, en el cual se ha adherido los puntos visitados en las salidas de campo.

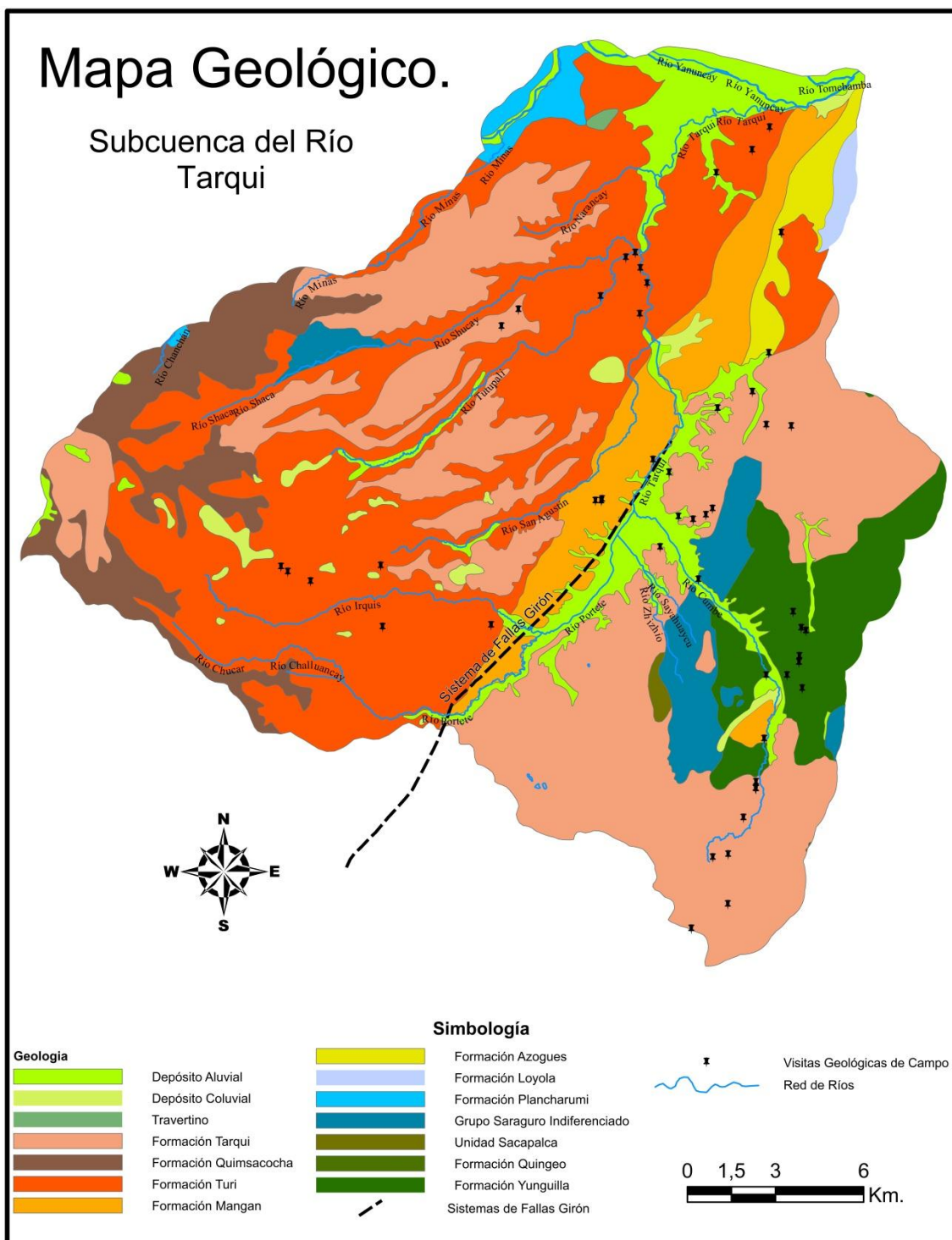


Ilustración 3-3 Geología de la Sub Cuenca del Río Tarqui

A continuación analizaremos la geología del área de estudio, partiendo de una descripción en forma general y regional, basados en los mapas proporcionados, hasta finalizar con una interpretación de la geología a escala local, basados en las salidas de campo.



3.1.2.1 Geología Regional

Litoestratigrafía.

Se describirán las formaciones presentes en la cuenca desde la más antigua a la más actual. Esta descripción general de las formaciones se ha tomado de los mapas geológicos existentes de la cuenca. (Britanica. & Minas, 1973; CODIGEM, 1997)

○ **Formación Yunguilla(Cretáceo Superior)**

Litológicamente hay predominancia de argilita negra, pasando a arcillas cafés obscuras o negras. La silicificación es común en varios niveles, encontrándose depósitos de caliza y concreciones carbonatadas en toda la secuencia. Es una secuencia turbidítica marina. Comprende limolitas laminadas, lutitas y areniscas finas de color gris oscuro. Las areniscas contienen cuarzo deformado y algo de moscovita detrítica. En el área de san Marcos parece haber un espesor de 1200 metros estimados en afloramientos.

○ **Formación Quingeo.(Eoceno Temprano)**

Está expuesta al Noroeste de Cumbe en donde sobre yace a la Unidad Yunguilla con la cual está en contacto transicional. Comprende una secuencia de areniscas rojas, limolitas y lutitas fuertemente bio-turbadas y socavadas.

○ **Unidad Sacapalca(Oligoceno Tardío)**

Se consideró previamente como restringida al graben Catamayo, sin embargo, estas rocas continúan hacia el Norte y forman una parte sustancial del afloramiento previamente mapeado como Formación Saraguro. La unidad comprende lavas andesíticas, brechas tobáceas, conglomerados, lutitas lacustres y tobas dacíticas esparcidas.

○ **Grupo Saraguro Indiferenciado(Eoceno Tardío)**

El Grupo Saraguro es una secuencia de rocas volcánicas sub aéreas, calco – alcalinas, intermedias a ácidas. Predominan composiciones andesíticas a dacíticas, pero son comunes rocas riolíticas.

○ **Formación Plancharumi.**

Corresponde a una secuencia pobremente litificadas de depósitos vulcano-clásticos riolíticos y sedimentos fluvio lacustres. Presenta tobas de flujo de cenizas blancas ricas en pómez, brechas riolíticas de flujos de masa, areniscas tobáceas, limolitas laminadas y tobas finas blancas. Algunos afloramientos presentan lavas riolíticas intensamente bandeadas por flujo, están intercaladas con sedimentos y tobas de ceniza fina que contienen abundante lapilli acrecionado que se interpretan como depósitos primarios caída en aire.

○ **Formación Loyola(Mioceno Inferior)**

El contacto de esta formación con la Biblián subyacente en el centro de la cuenca es gradual, pero cerca del margen, en el lado este, un conglomerado



basal sobrepasa la Biblián para descansar en la formación Yunguilla. Los depósitos superiores de aproximadamente 250m. De espesor, consisten casi íntegramente de lutitas grises oscuras, de color amarillo claro, meteorizadas y rojizas con una flora variada pero sin diagnóstico. El yeso abunda en casi todos los niveles y se observaron calizas cristalinas de 2m. De largo por 50cm. De espesor.

- **Formación Azogues.(Mioceno Medio)**

La formación Azogues es la que mejor desarrollo tiene en los dos lados del sinclinal de la Cuenca de Cuenca; se extiende desde el norte de la ciudad con el mismo nombre hasta desaparecer cerca de la discordancia producida con la formación Turi. La secuencia está predominada por areniscas tobáceas, gruesas de color café, pero los depósitos de limolitas y arcilla generalmente no tienen más de 1m de espesor. Un conglomerado basal bien desarrollado puede encontrarse donde la formación ha propasado los subyacentes. Existe un conglomerado de origen ígneo con depositación cruzada en diferentes niveles. Alcanza una potencia aproximada de 300m.

- **Formación Mangán(Mioceno superior)**

Bristow (1973) hizo una división de tres niveles para una mejor descripción, consiste de argilitas, lutitas y areniscas de grano fino, estratificadas en capas de 1m de potencia. Las arcillas y lutitas tienen una coloración clara, las argilitas son grises, bastante compactas. Lutitas finamente laminadas están asociadas con el yacimiento de carbón inferior. Son comunes las hojas fósiles. El contacto con la formación azogues es gradual debido a su semejanza litológica.

- **Formación Turi.(Mioceno tardío)**

Generalmente el depósito basal de la formación es un conglomerado que forma escarpas, sobre la que viene una sucesión de capas guijarrosas, limosas y arenosas. Comprende rocas sedimentarias fluviales confinadas a la cuenca de Cuenca. La formación Turi tiene unos 200 metros de potencia disminuyendo hacia el norte. El material conglomerático muestra cambios abruptos en el tamaño de los cantos de acuerdo al buzamiento, la parte alta de la formación contiene argilitas y areniscas con cierto contenido de bloques angulares. El conglomerado es básicamente de origen volcánico. Descansa discordantemente sobre el grupo Saraguro y esta sobreyacida por la formación Quimsacocha. Fue considerada del Plioceno, pero nuevas dataciones de trazas de fisión indican una edad del Mioceno Tardío.

- **Formación Quimsacocha.(Mioceno Tardío)**

Corona la Formación Turi alrededor de la caldera de Quimsacocha. La edad es incierta pero podría ser Mioceno Tardío o más joven.

La Formación Quimsacocha comprende una secuencia de lavas y tobas - brechas de flujo de composición andesíticas, interpretados como productos proximales de un estrato volcán cuya localización está indicada por una depresión del cráter casi circular de 4 km de diámetro, la caldera de



Quimsacocha es considerada como resultado de una relativa subsidencia de la erupción de una toba silíceo de la formación Tarqui.

- **Formación Tarqui.(Pleistoceno)**

Comprende una secuencia volcánica gruesa. Las rocas constituyentes son piroclásticas ácidas, pero ocasionalmente se observan lavas. En ciertos lugares por alteración hidrotermal se ha alterado la roca original a caolín. Puede ser dividida en tres unidades estratigráficas: flujos oscuros de grano fino y composición andesíticas, sobre estos yace una secuencia de tobas de composición dacíticas y riolíticas. Estos piroclastos alternan con flujos delgados de composición similar. La unidad superior está compuesta por flujos de riolita homogénea de grano medio que afloran en la parte alta de los valles formando colinas bajas, bien definidas. La mayoría de las rocas presentan alteración que es el resultado de procesos metasomáticos e hidrotermales.

- **Travertino.(Holoceno)**

Provee de caliza a la fábrica de Cemento guapan.se cree que el Travertino tiene su origen en la formación yunguilla calcárea. El Travertino que se encuentra en la formación contiene moluscos y residuos humanos recientes.. Se pueden distinguir cuatro tipos: terrazas de hasta 20 metros de potencia y de varias hectáreas de extensión, bloque eluviales, incluidos en arcillas residuales, y bloques aluviales de hasta 10 metros. La depositación debido a la presencia de calcita en aguas termales aún continúa en el tipo de terrazas y ha cesado en los otros tres tipos. Se han encontrado huesos humanos y varias conchas en los depósitos, pero se desconoce la edad de los depósitos erosionados.

- **Depósito Coluviales y Aluviales(Holoceno)**

Muchos de los valles tienen sus laderas cubiertas con una capa de material Coluvial. Este material quizás se originó como talud durante el Pleistoceno tardío, pero su formación continua hasta ahora. Depósitos aluviales se encuentra en la mayoría de los valles amplios y en pequeñas depresiones aisladas.

3.1.2.2 Geología Estructural

Cerca del proyecto Quimsacocha, existe una falla regional conocida como Gañarín, activa actualmente, con una dirección aproximada de Norte 45° Este, el sentido de empuje es Noreste – Suroeste.

Cerca del cantón Girón, fuera del área de interés, inicia el “Sistema de Fallas Girón”, en dirección noreste, paralela al Río Portete como se puede observar en la Ilustración 3-3. Con una longitud aproximada de 18,5 km, afecta únicamente en 12,5 km a la Sub Cuenca del Río Tarqui. Llegando hasta cerca de un kilómetro de la “Y” del Portete en dirección a la ciudad de Cuenca.(CODIGEM, 1997)

La falla atraviesa las formaciones Turi, Mangan y Depósitos Aluviales dentro de la cuenca.



Los dos sistemas estructurales mencionados corresponden a fallas transcurrentes profundas que controlan la presencia de actividad volcánica, algunas zonas de alteración y mineralización.

3.1.2.3 Geología Local

Se realizaron paradas de campo para corroborar la información geológica digital recopilada. En la Ilustración 3-4. En la sección de Anexos, se incluirán el informe correspondiente a cada parada geológica realizada.

Cabe destacar la zona de La Merced, aproximadamente a 2,5 kilómetros de la Estación de Cumbe, se encontraron gran cantidad de ojos de agua y lagunas, esto en las zonas bajas de la cuenca, muy próximas al Río Tarqui, lo cual nos motiva a pensar que es aquí en donde existe mayor probabilidad de existencia de agua sub superficial y subterránea.

Nuestras suposiciones son fortalecidas con los testimonios de los habitantes del lugar, que afirman que la hierba nunca se seca, además de varios pozos artesanales construidos en la parte baja de la cuenca, destacando el pozo encontrado en la parada 22 “Cumbe La Merced Pozo”, de éste tan solo con una profundidad de 12m, se logran obtener caudales importantes que son utilizados para el riego y el ganado. Otra evidencia de escurrimiento sub superficial

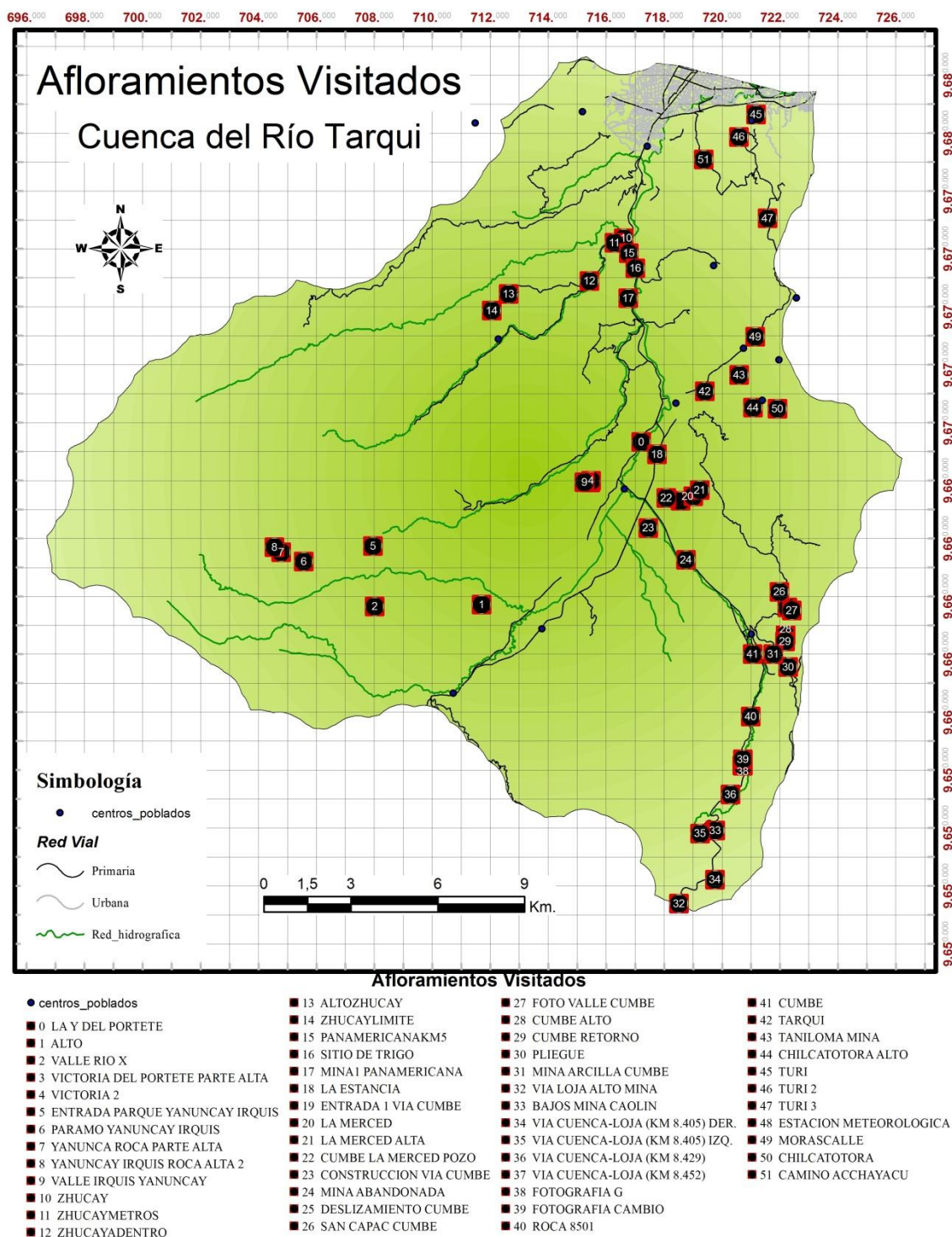


Ilustración 3-4 Visitas Geológicas de Campo



pueden ser los deslizamientos que se producen en la parte baja de Cumbe.

Se realizaron 4 salidas de campo para recorrer diversas rutas de la Subcuenca del Tarqui entre los meses de junio y julio, las cuales consistieron en:

- Reconocimiento de vías y caminos de acceso.
- Planificación de cuatro rutas por las zonas más representativas de la Subcuenca buscando cubrir la variación de la geología, aclarando que en algunos casos la limitación se dio por las vías de acceso.
- Ubicación y estudio de afloramientos, poniendo énfasis en sectores donde exista un cambio brusco de litología, donde se observen estructuras de interés y donde la información sea escasa.
- Descripción litológica de los afloramientos mediante fichas de campo que contienen información generalizada del talud y su entorno y recolección de muestras para su posterior análisis.
- Análisis e identificación de muestras para relacionar con información existente y su posterior ubicación en mapa SIG.

De las visitas realizadas a la Subcuenca y de los afloramientos geológicos estudiados, hemos constatado los elementos que predominan en la litología de las distintas formaciones de la Subcuenca del Río Tarqui. Con esto podemos relacionar las zonas de la cuenca que no cuenta con información y la zona donde se ubican los pozos del G.P.A, que es el sector con el que mayor información disponemos de toda el área de estudio.

A continuación se describirán los afloramientos visitados en orden de salidas al campo.

Salida 1

En la primera salida, se atraviesa por las formaciones Mangan, Tarqui, Turi y Quimsacocha de los sectores de Victoria del Portete y Quimsacocha

DESCRIPCION DE AFLORAMIENTOS GEOLOGICOS					
PNT	FORMACION	LITOLOGIA	PNT	FORMACION	LITOLOGIA
1.1	Mangan	Arenisca compacta con matriz arcillo limosa	1.5	Turi	Arenisca muy meteorizada, con presencia de lutitas
1.2	Tarqui	Toba con incrustaciones de pómez	1.6	Turi	Arenisca compacta sobre toba compacta
1.3	Turi	Areniscas con caolín y tobas con conglomerados	1.7	Quimsacocha	Roca volcánica con andesitas
1.4	Turi	Paquete de conglomerados y arenas			

Tabla 4 Salida 1, Descripción de afloramientos Geológicos (Barbecho & Calle, 2012)

Salida 2

En la segunda salida, se atraviesa por las formaciones Turi, Tarqui y Yunguilla de los sectores de Zhucay, la Panamericana y Cumbe alto.

DESCRIPCION DE AFLORAMIENTOS GEOLOGICOS					
PNT	FORMACION	LITOLOGIA	PNT	FORMACION	LITOLOGIA
2.1	Turi	Arenisca fina con carbonato de calcio, limo y lutitas	2.11	Tarqui	Toba compacta de color rojizo y blanco



2.2	Turi	Arenisca blanca depositada	2.12	Tarqui	Toba de color café
2.3	Turi	Arenisca muy alterada con estratos de lutitas	2.13	Tarqui	Tobas de color café y rojas alteradas
2.4	Tarqui	Arcilla rojiza con presencia de pómez	2.14	Tarqui	Meteorizada con caolín
2.5	Turi	Arena muy fina con presencia de lutitas	2.15	Yunguilla	Argilitas meteorizadas
2.6	Turi	Arena muy fina con presencia de lutitas	2.16	Yunguilla	Argilitas meteorizadas
2.7	Turi	Conglomerados cubiertos por tobas de color blanco	2.17	Yunguilla	Argilitas meteorizadas
2.8	Tarqui	Aluvial muy fino y meteorizado	2.18	Yunguilla	Areniscas de color café amarillento
2.9	Tarqui	Tobas blancas amarillentas	2.19	Yunguilla	Areniscas
2.10	Tarqui	Roca alterada con toba y arcilla compacta	2.20	Yunguilla	Arcilla roja con presencia argilitas

Tabla 5 Salida 2, Descripción de afloramientos Geológicos (Barbecho & Calle, 2012)

Salida 3

En la tercera salida, se atraviesa por las formaciones Tarqui y Yunguilla de los sectores de vía Cumbe, Tarqui, la vía Cuenca-Loja y Chilcatotora alto.

DESCRIPCION DE AFLORAMIENTOS GEOLOGICOS					
PNT	FORMACION	LITOLOGIA	PNT	FORMACION	LITOLOGIA
3.1	Tarqui	Caolín material muy diaclasado	3.7	Tarqui	Caolín
3.2	Tarqui	Arcilla con varios minerales, caolín óxido de hierro	3.8	Yunguilla	Argilitas negras muy diaclasadas
3.3	Tarqui	Material arcilloso brechificado	3.9	Tarqui	Brechas con clastos angulares y tobas
3.4	Tarqui	Caolín	3.10	Tarqui	Tobas
3.5	Tarqui	Roca con matriz arcillosa y de cuarzo	3.11	Tarqui	Incrustaciones de cuarzo
3.6	Tarqui	Tobas	3.12	Tarqui	Tobas amarillentas

Tabla 6 Salida 3, Descripción de afloramientos Geológicos (Barbecho & Calle, 2012)

Salida 4

En la cuarta salida, se atraviesa por las formaciones Tarqui, Turi y Azogues de los sectores de Turi, Acchayacu y Morascale.

DESCRIPCION DE AFLORAMIENTOS GEOLOGICOS					
PNT	FORMACION	LITOLOGIA	PNT	FORMACION	LITOLOGIA
4.1	Turi	Arenisca brechoide con clastos angulares y matriz arenosa	4.5	Azogues	Arenisca compactada color blanco amarillento
4.2	Turi	Arenisca fina estratificada	4.6	Tarqui	Tobas amarillentas
4.3	Azogues	Lutitas con matriz arcillo limosa	4.7	Turi	Arcillas y areniscas
4.4	Turi	Lutitas			

Tabla 7 Salida 4, Descripción de afloramientos Geológicos (Barbecho & Calle, 2012)

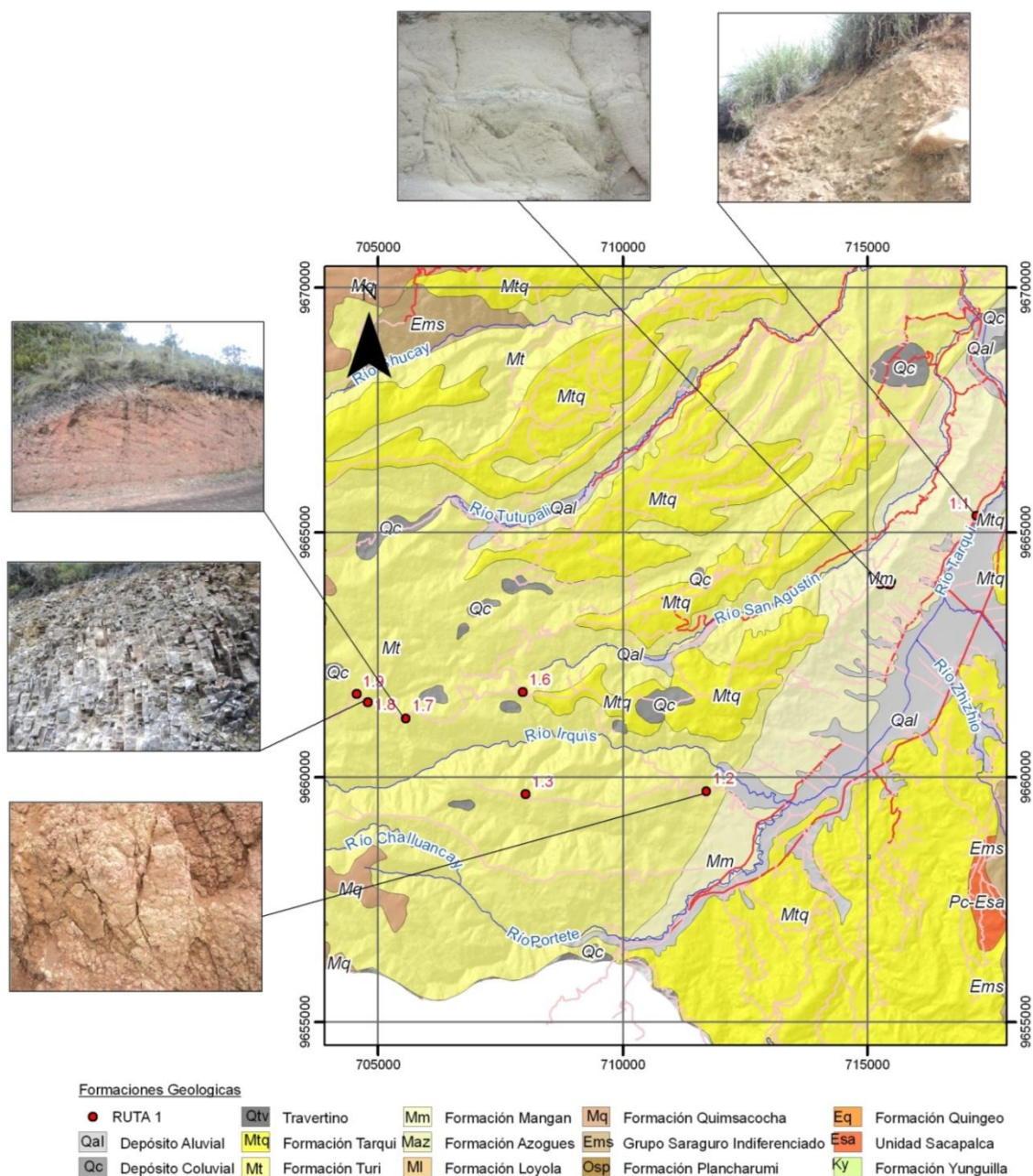


Ilustración 3-5 , Salida 1, Ubicación y fotografías de los afloramientos (Barbecho & Calle, 2012)

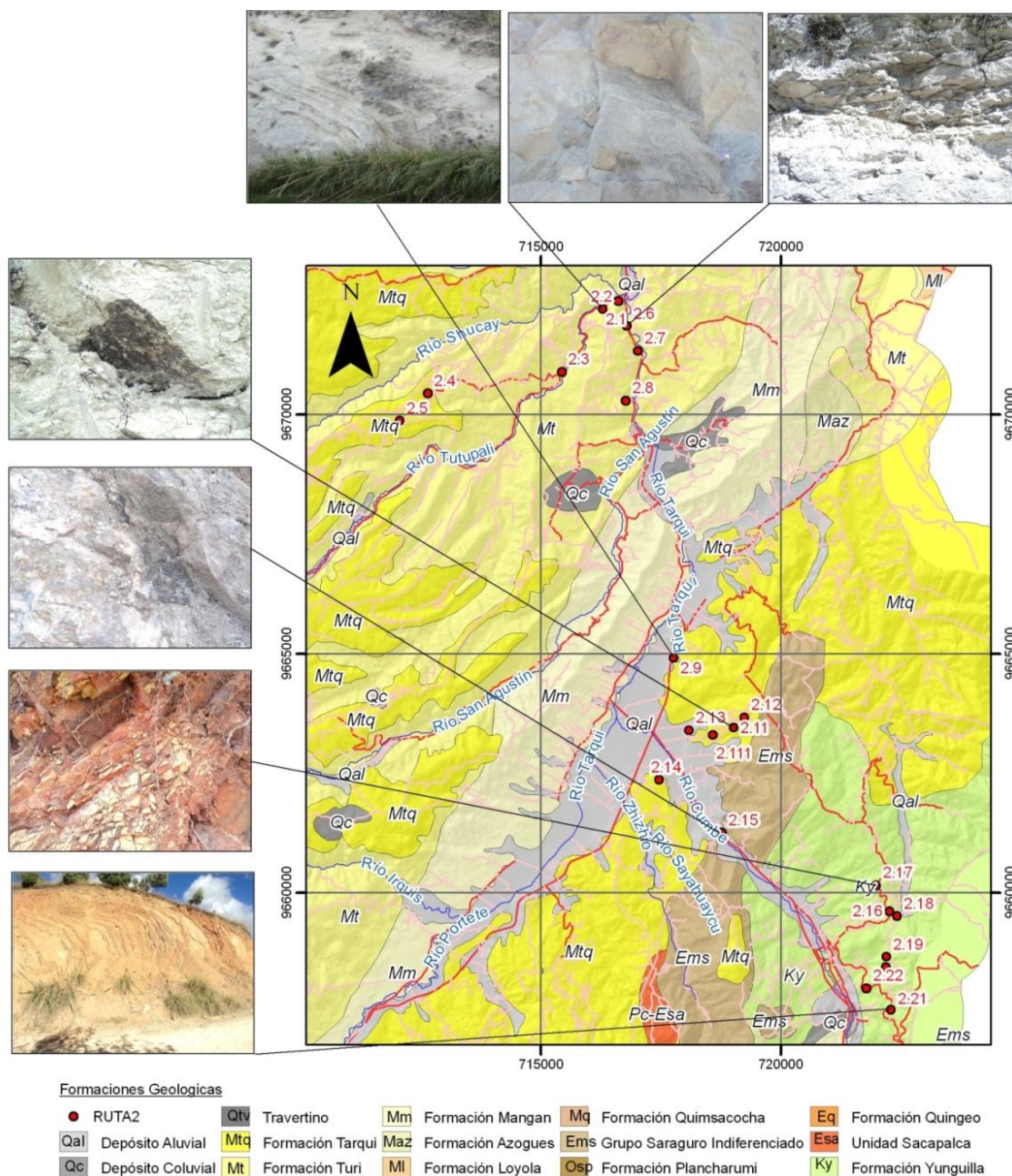


Ilustración 3-6 Salida 2, Ubicación y Fotografías de los Afloramientos (Barbecho & Calle, 2012)

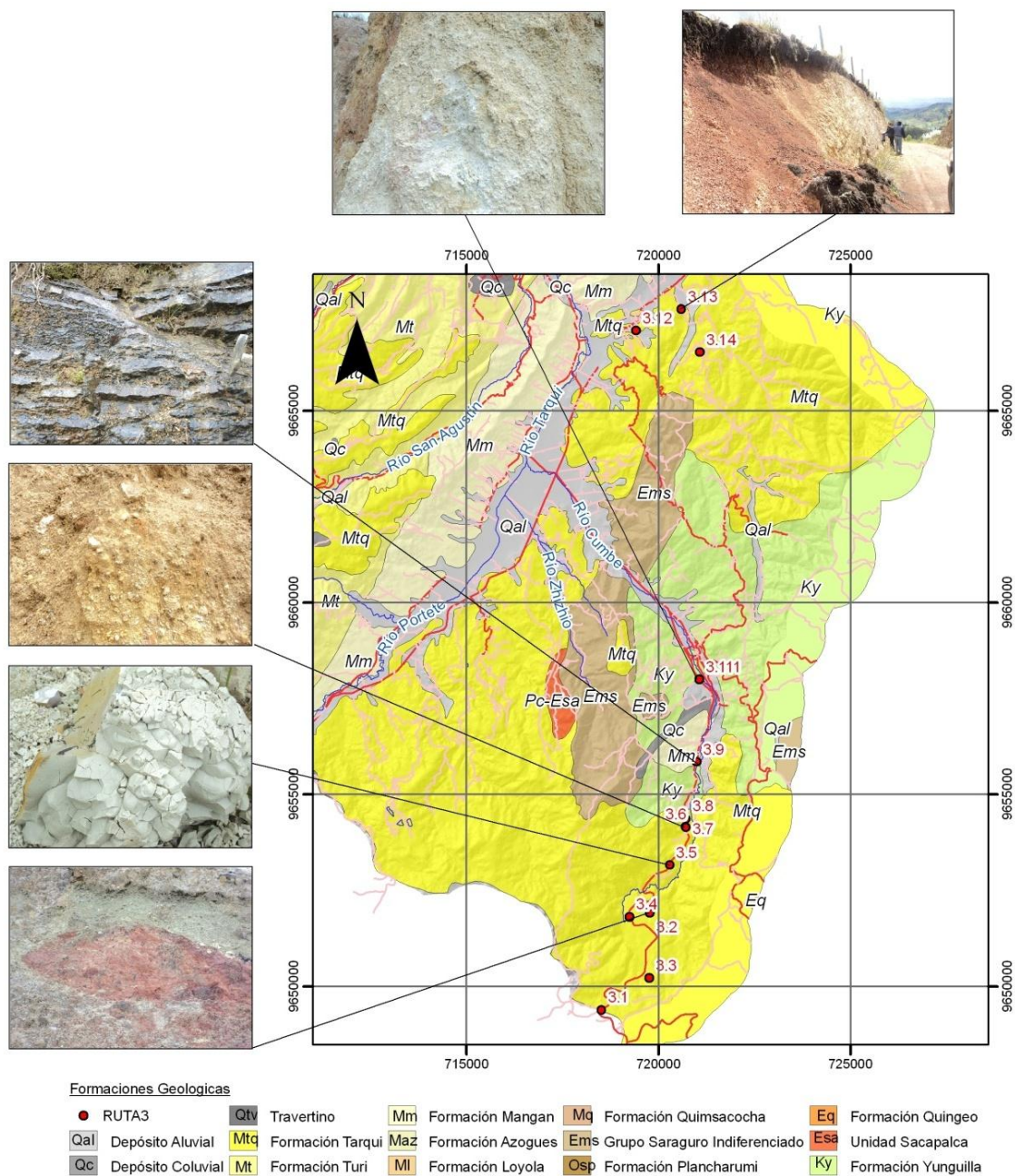


Ilustración 3-7 Salida 3, Ubicación y Fotografías de los Afloramientos (Barbecho & Calle, 2012)

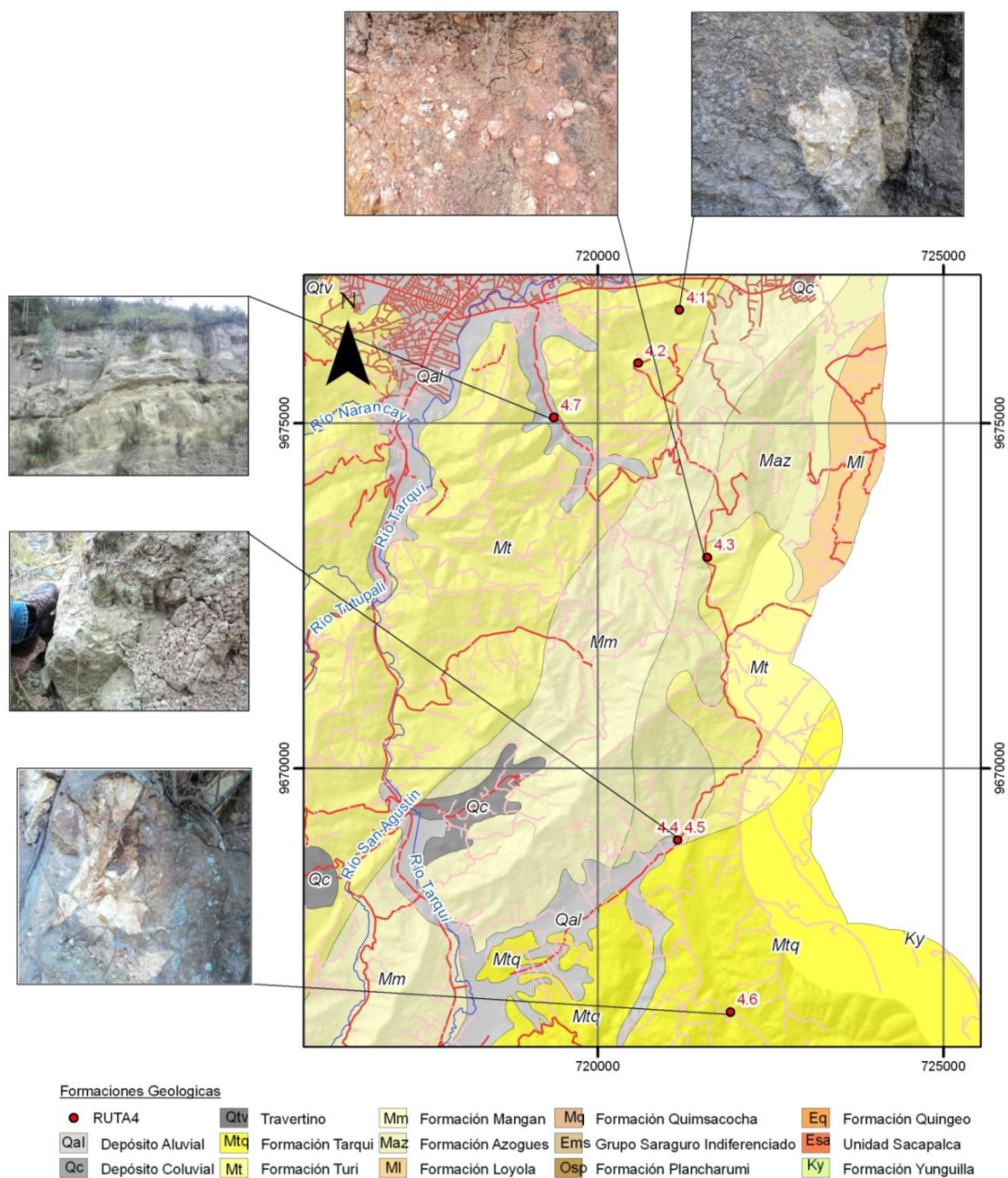


Ilustración 3-8 Salida 4, Ubicación y Fotografías de los Afloramientos (Barbecho & Calle, 2012)



3.2 Análisis Multicriterio.

3.2.1 Introducción

En esta etapa trabajaremos con todos los datos recopilados a lo largo de esta investigación, referente a la Subcuenca del Río Tarqui. El problema a resolver será el siguiente: generar mapas con las zonas más aptas para la ubicación y recarga de acuíferos en la Subcuenca del Río Tarqui, para proponer una red de monitoreo.

Las zonas de recarga y ubicación de acuíferos, será el resultado obtenido de un análisis multicriterio realizado con un software de información geográfico (GIS). Luego de encontrar dichas zonas, se hará un registro de fotografías, las cuales servirán para conocer la idoneidad de dichas zonas para la instalación de puntos de monitoreo tomando en cuenta la facilidad de acceso y construcción.

El empleo de técnicas de evaluación multicriterio, combinan y valoran simultáneamente criterios base para la toma de decisiones. Estos se componen de factores, aspectos que fortalecen o debilitan los criterios, a través del manejo de atributos (variables) dentro de determinadas reglas de decisión y valoración (Barredo, 1996). Habrá que establecer cuáles son las variables del territorio indicadas y cuál es la forma adecuada para su medida. Tales decisiones denominadas “reglas de decisión” o “juicios de valor” son parte esencial de la evaluación. (Jiménez & Ocaña, 2000)

Se buscarán criterios bien definidos, que en combinación con SIG se sitúan en poder resolver con todo rigor la interrelación de las diversas variables. Un atributo cualquiera contenido en cada una de las capas de información de un SIG, pueden ser considerados como un factor positivo o negativo para un determinado objetivo. Puede ser valorado en conjunto con otros y en función de ello contrarrestado, potenciado o anulado. (Jiménez & Ocaña, 2000)

3.2.2 Preparación de la Información y Procedimientos de la Evaluación.

El análisis multicriterio se lo hará con la ayuda del software ARCGIS.

El software empleará distintos Mapas (criterios). Los datos disponibles para el análisis son los siguientes:

- Mapa de Conductividad;
- Mapa de Pendientes;
- Mapa de Precipitaciones;
- Mapa de Caudales de Recuperación;
- Mapa de Elevaciones;
- Mapa de Usos del suelo;

Cada mapa tendrá su variable, a la cual se le asignará un peso según el aporte a la ubicación de zonas de recarga y ubicación de acuíferos. Así en el mapa de



conductividad tendrán mayor peso o calificación las formaciones con mayor conductividad, en el mapa de precipitaciones tendrán mayor calificación las zonas con mayor precipitación, y así con los demás criterios.

Empleando ArcGIS, se agregaron todas las capas de los criterios (Conductividad, Precipitaciones, Pendientes, Recuperación, Uso de Suelo y Elevación), ya generados los pesos de los criterios, de acuerdo a lo explicado respectivamente en cada sección, a manera de atributo. A continuación se utilizó la herramienta para realizar cálculos de capas en formato raster (“Raster Calculator”), en la caja de herramientas de Análisis Espacial (“Spatial Analyst”). En esta se realizaron la suma de criterios de acuerdo a lo necesitado para cada mapa multicriterio, esto está indicado en cada mapa, los criterios empleados. Y al resultado de esta operación, únicamente se hace una reclasificación (“reclassify”) para poder obtener la suma de criterios de acuerdo a los porcentajes que nos interesan para contrastar los resultados de una mejor manera. Es importante destacar, que el mapa multicriterio puede basarse en diferentes operaciones matemáticas (suma, resta, multiplicación y/o división) entre los criterios. Nosotros hemos tomado la suma de criterios ya que lo que se busca es tener una puntuación considerando los criterios que aporten tanto a la recarga como a la ubicación de acuíferos.

Los mapas son el resultado de las respectivas puntuaciones generadas por ARCGIS en el análisis multicriterio. En estos mapas, los resultados respecto a las actividades establecidas se pueden hacer comparables, lo que significa que las puntuaciones reclasificadas o agrupadas dan lugar a clases que alcanzan un cierto valor de porcentaje en función de la calificación máxima de la suma de los criterios. Quedando la Subcuenca dividida en áreas a las que se le atribuye un uso óptimo y áreas que no lo tienen.

3.2.2.1 Mapa de Pendientes.

Una pendiente inclinada de la superficie favorece la escorrentía superficial, y si son menos fuertes, retienen por más tiempo el agua favoreciendo la infiltración. Se clasificó las pendientes de la cuenca en base al criterio establecido en la Tabla 8.

CLASIFICACION DE PENDIENTES BASADAS EN EL MODELO DE ELEVACION DIGITAL DE LA SUBCUENCA DEL RIO TARQUI			
Clase	Descripción	% de Pendiente	Peso del Criterio
1	Plano	0,0 – 0,2	5,0
2	Nivel	0,2 – 0,5	4,9
3	Cercano al Nivel	0,5 – 1,0	4,8
4	Muy Ligeramente Inclinado	1,0 – 2,0	4,7



5	Ligeramente Inclinado	2,0 – 5,0	4,4
6	Inclinado	5,0 – 10	3,8
7	Fuertemente Inclinado	10 – 15	3,1
8	Moderadamente Escarpado	15 – 30	1,6
9	Escarpado	30 – 60	0
10	Muy Escarpado	> 60	0

Tabla 8 Clasificación de Pendientes. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación 2009)

El peso del criterio se tomó arbitrariamente dando un valor máximo de 5 a las pendientes más favorables para la infiltración (más planas), y distribuyendo de una forma lineal hacia las pendientes más pronunciadas, obteniendo valores de 0 para pendientes mayores a 30%, ya que estas pendientes favorecen la escorrentía superficial y no permiten la infiltración, por lo tanto no tienen interés dentro de lo que queremos demostrar con el criterio.

$$\text{Peso del Criterio} = 5 - (\% \text{promedio} * 3) \frac{5}{100}$$

Se obtiene el peso del criterio en una escala que establece 5 como el máximo valor posible, y multiplicando al porcentaje de pendiente por un factor de mayoración que resalta la importancia de las pendientes más bajas. Estableciendo la escala de valores dentro de un esquema lineal basado en una regla de tres.

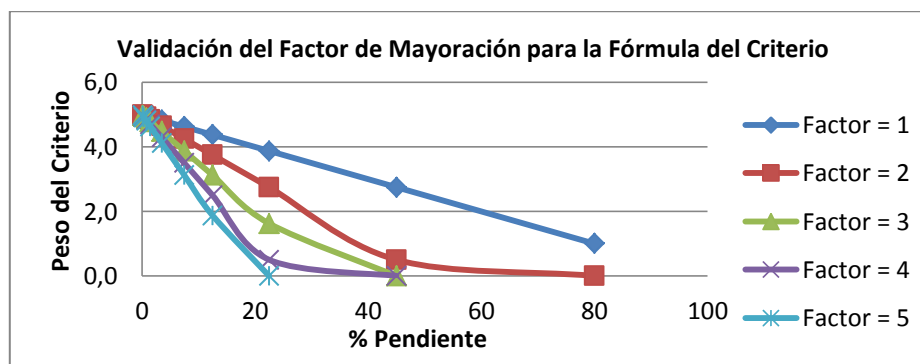
En la Tabla 9 que se muestra a continuación, se ilustra la variación del peso del criterio con la variación del factor de mayoración, se puede ver fácilmente que mientras mayor es el factor, se da mayor peso a pendientes menores, y viceversa cuando menor es el criterio se da mayor peso a pendientes menores, el punto más indicado para la aplicación en nuestro caso, lo encontramos con el factor = 3. Y los resultados se muestran en el mapa presentado en la Ilustración 3-9.

% Promedio	Criterio				
	Factor = 1	Factor = 2	Factor = 3	Factor = 4	Factor = 5
0,1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
0,35	5,0	5,0	4,9	4,9	4,9
0,75	5,0	4,9	4,9	4,9	4,8
1,5	4,9	4,9	4,8	4,7	4,6
3,5	4,8	4,7	4,5	4,3	4,1
7,5	4,6	4,3	3,9	3,5	3,1
12,5	4,4	3,8	3,1	2,5	1,9



22,5	3,9	2,8	1,6	0,5	0,0
45	2,8	0,5	0,0	0,0	0,0
80	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 9 Variación del Factor del Criterio en función del % Promedio



Mapa de Pendientes Cuenca del Río Tarqui

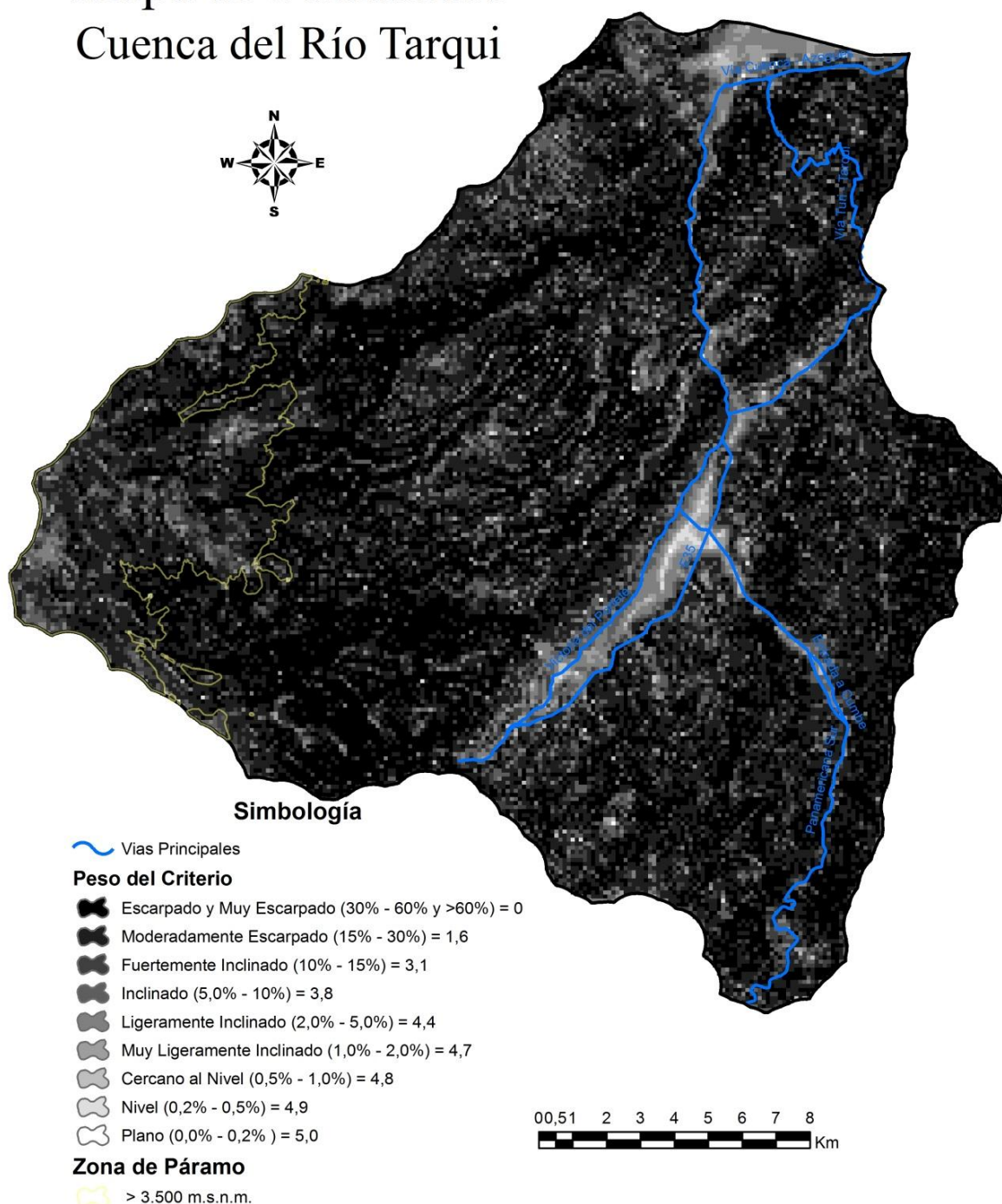


Ilustración 3-9 Mapa de Pendientes.

3.2.2.2 Mapa de Precipitaciones

Se empleará este elemento como criterio para encontrar las zonas de recarga. Si bien la precipitación es importante para la recarga de un acuífero no es determinante para su ubicación, ya que la recarga de un acuífero puede provenir de una cuenca aledaña o de la propia cuenca en que se ubique el acuífero.



Como se vio en 2.1 se toma en cuenta este criterio para ubicar los lugares con mayor o menor precipitación. Esto en conjunto con un mapa de pendientes generará zonas con mayor tendencia de escorrentía superficial o de infiltración, para encontrar las zonas más probables de recarga de acuíferos.

Con la información obtenida de las estaciones meteorológicas proporcionadas por (Geomática & PROMAS, 2012), se ha elaborado un mapa de precipitaciones, con la ayuda de ArcGIS, empleando la función IDW (Inverse Distance Weighted), el programa realiza una interpolación que calcula los valores de celda por el promedio de valores de puntos de datos que se muestra cercano a cada célula del proceso. Cuanto más cerca de un punto es el centro de la celda, más influencia o peso que tiene en el resultado promediado. Para el caso de las precipitaciones, al tener los valores puntuales de las estaciones, la interpolación la hace conforme se acerca a las estaciones cercanas, dándole el peso más parecido al asignado a la estación meteorológica. Posteriormente se ha reclasificado los resultados con el fin de poderlo emplear como criterio para la decisión de la red de monitoreo.

Las precipitaciones en la cuenca oscilan entre 637 mm/año y 1.105 mm/año, separando en intervalos iguales, espaciados 52 unidades, obtenemos 10 clases como se muestra en la siguiente tabla.

Clase	Precipitación mm/año	Peso del Criterio
1	624 – 676	1
2	676 – 728	1,4
3	728 – 780	1,9
4	780 – 832	2,3
5	832 – 884	2,8
6	884 – 936	3,2
7	936 – 988	3,7
8	988 – 1040	4,1
9	1040 – 1092	4,6
10	1092 - 1144	5

Al igual que en el mapa anterior se aplicará un peso al criterio de precipitaciones para ser tomado en cuenta al combinar los criterios disponibles, análogamente se tomara el valor de 5 para el caso más favorable para aguas



subterráneas, es decir la mayor precipitación y se tomara el valor de 1 para la clase con menor precipitación acumulada anual, logrando una distribución lineal para los valores intermedios.

El mapa generado mediante este criterio se muestra en la Ilustración 3-10

Mapa de Precipitaciones Cuenca del Río Tarqui

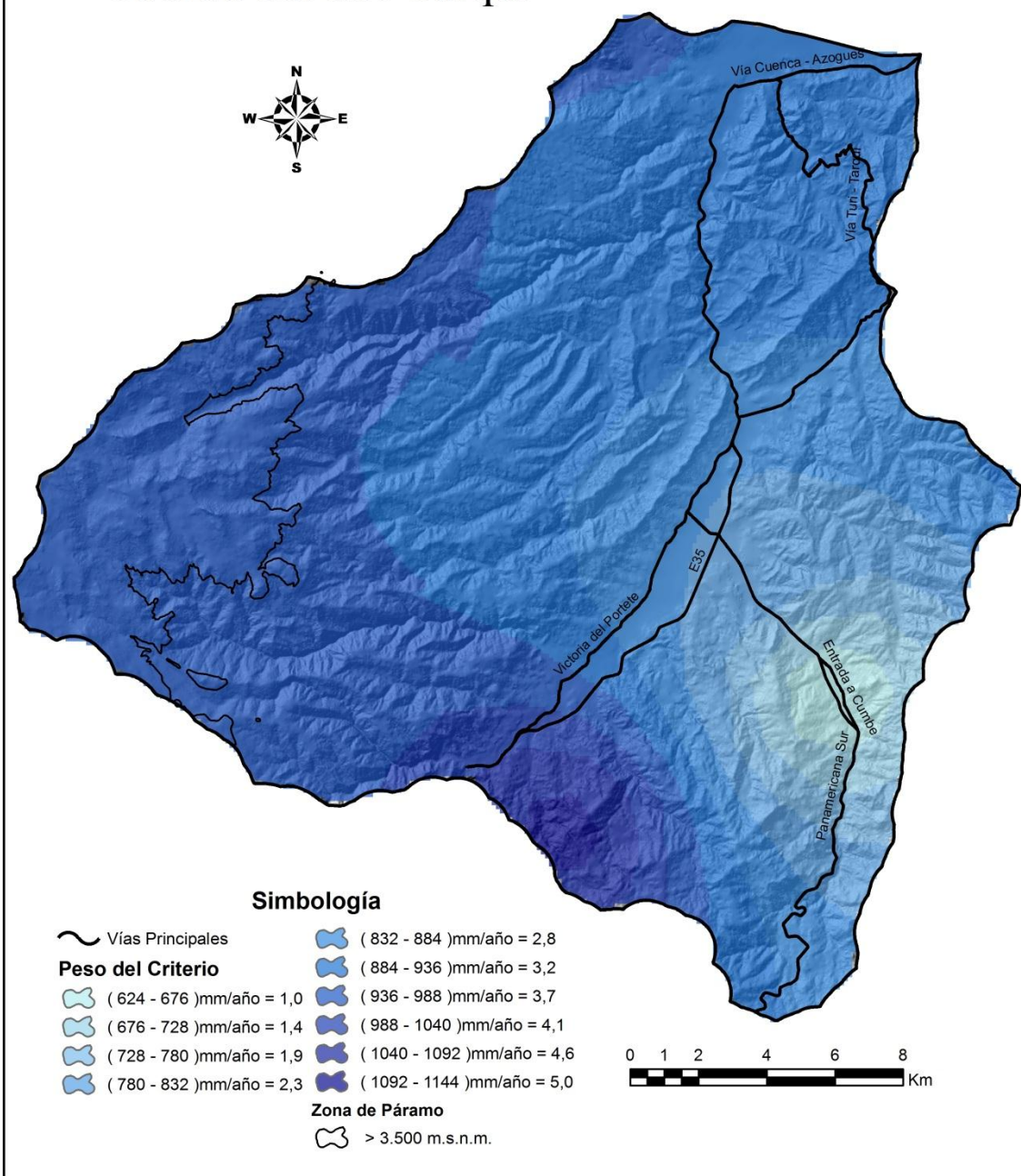


Ilustración 3-10 Mapa de Precipitaciones

3.2.2.3

Mapa de Conductividad:

Este mapa nos ayudará para conocer las zonas con mejor drenaje, usándola en conjunto con los mapas de pendiente y precipitación de la Subcuenca para establecer zonas más probables de recarga. Se tomará a su vez la conductividad como una variable de la función transmisora para la ubicación de los estratos más aptos para la formación de acuíferos.



Se usarán los resultados en revisión de (Barbecho & Calle, 2012), quienes determinan un mapa de conductividad hidráulica de la Subcuenca.

- La caracterización hidráulica dentro de la Subcuenca, ellos la realizan de forma puntual y zonal, debido a la variabilidad en composición litológica, los rangos de valores zonales son muy amplios, por lo tanto, los autores recomiendan que se haga el empleo de los dos tipos de resultados (zonal y puntual) de manera simultánea. Los zonales se utilizarán cuando no existan valores puntuales y se necesite conocer la caracterización de la zona, si se conoce la litología, se deberá basar en la tabla "Valores estimativos de conductividad hidráulica en función de la composición litológica para suelos de la micro cuenca del río Tarquí". (Barbecho & Calle, 2012)
- El **"Mapa de estimación de rangos de Conductividad Hidráulica en función de la geología para la micro cuenca del río Tarquí"** determina en base de la similitud entre las formaciones y en función de la litología, las formaciones que tengan mayor conductividad hidráulica, representando así, de manera más real el comportamiento de la Subcuenca a pesar del amplio rango de valores considerado.

Se requiere de un mapa zonal (raster) para emplear ArcGIS en el análisis multicriterio, por este motivo se ha tomado el mapa zonal mostrado en la Ilustración 3-11.

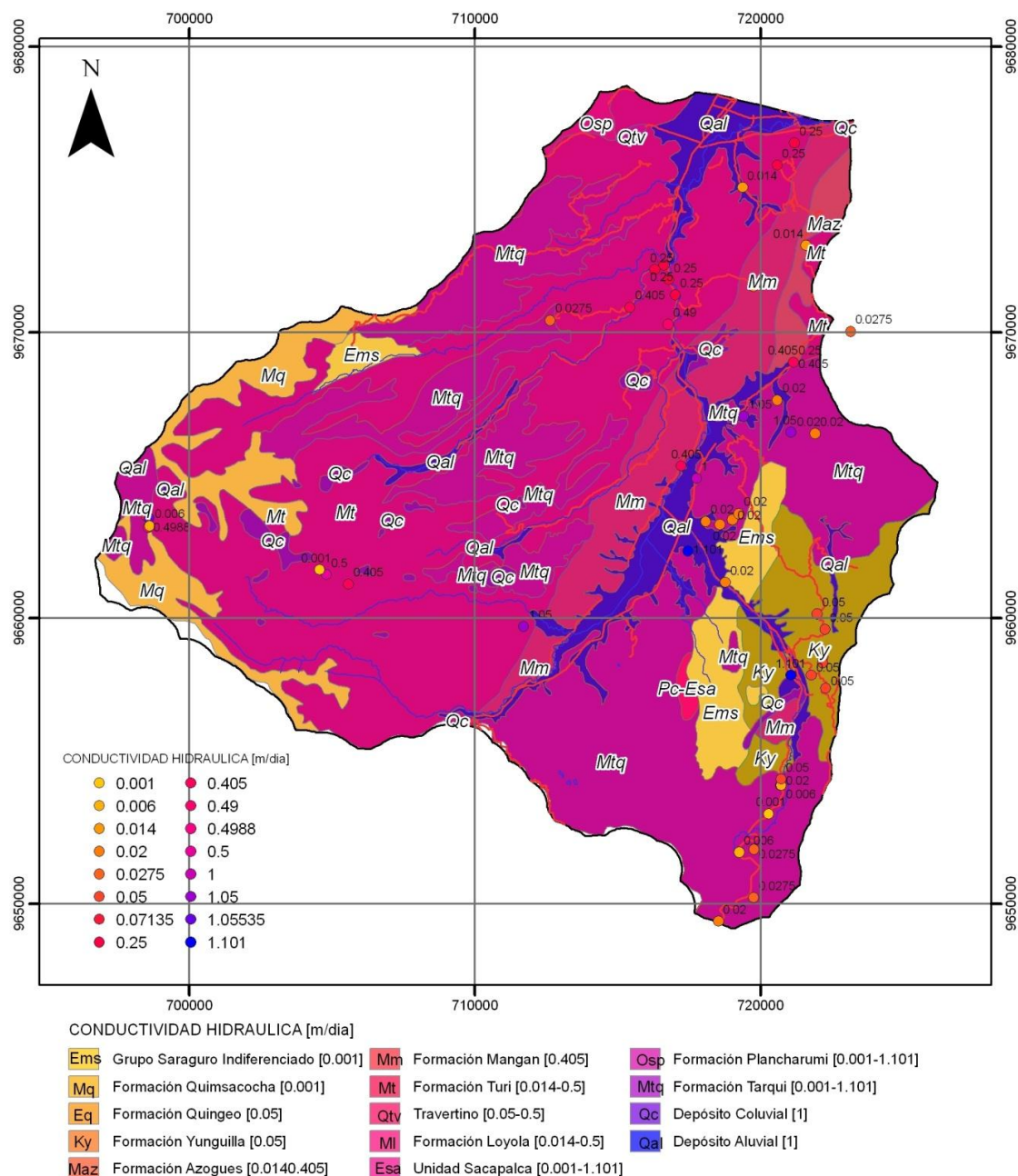


Ilustración 3-11 Mapa de Estimación de Rangos de Conductividad Hidráulica en función de la Geología para la micro cuenca del río Tarqui (Barbecho & Calle, 2012)

Para efectos del análisis multicriterio, se han agrupado los valores de conductividad de las formaciones en rangos (Ilustración 3-12), asignándoles un peso a cada grupo, a mayor conductividad mayor peso. Se consideran formaciones con conductividad muy lenta a las que presenten valores <0.001 metros/día, lentas a aquellas con valores entre 0.001-0.05 metros día, moderadamente lentas las que contienen valores de 0.05-0.5 metros/día y como moderadas las que se encuentren en el rango de 0.5-1.1 metros/día. Variando los pesos para el criterio de 1 a 5 según corresponda.

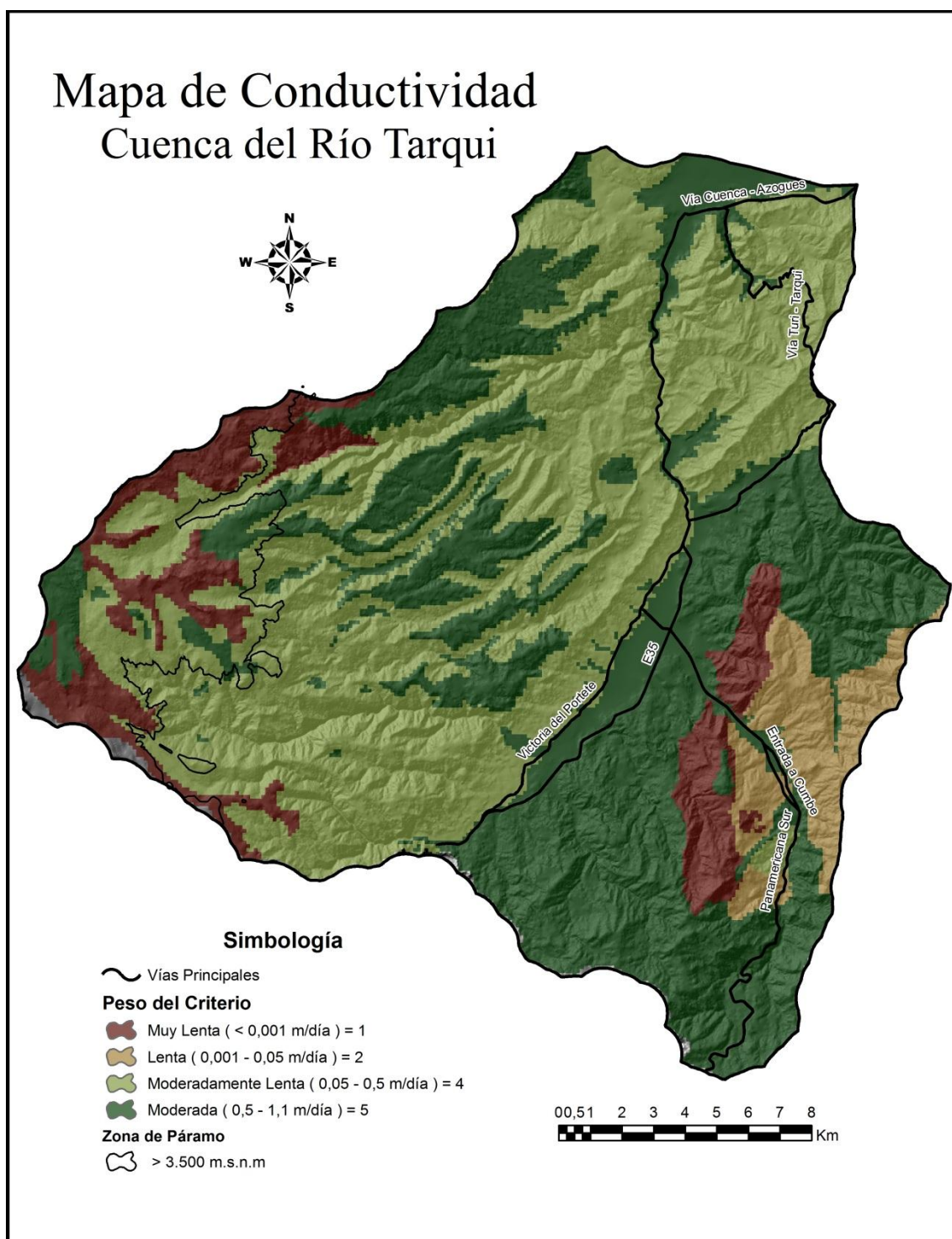


Ilustración 3-12 Mapa de Conductividad

3.2.2.4 Mapa de Caudales de Recuperación

Como se vio en 2.3.2 pueden estudiarse los diversos materiales que conforman la estratigrafía de las formaciones geológicas, desde un punto de vista de aptitud para la creación de acuíferos. Se usará un mapa de caudales de recuperación en función de la litografía presente en cada formación de la Subcuenca del Río Tarqui. De esta forma pretendemos ubicar los acuíferos en las formaciones que pueden aportar mejores condiciones en cuanto a la



función de un acuífero para almacenar y permitir la extracción de agua. Estudios posteriores que aporten más criterios para la determinación de dichas zonas, afirmarían los resultados de este trabajo y propondrán más zonas de estudio.

Debido a la falta de testigos en los pozos del G.P.A, en la investigación (Barbecho & Calle, 2012), se ha partido de los registros eléctricos proporcionados por el G.P.A para determinar los posibles estratos presentes en los pozos. La obtención del mapa de caudales de recuperación, se ha basado en un análisis de las pruebas de bombeo e interpretación de los registros eléctricos verticales de los pozos del G.P.A,

A partir de la similitud de los materiales presentes en las perforaciones realizadas por el Gobierno provincial del Azuay (G.P.A) y los materiales predominantes en las distintas formaciones geológicas de la Subcuenca, se dará un valor probable de caudal de bombeo a cada una de ellas, partiendo como información base del caudal de bombeo de los pozos de Morascale, Chilcatotora, Acchayacu y Gullanzhapa perforados por el G.P.A. Una aproximación bastante brusca, sin embargo dará un resultado más claro de la ubicación de acuíferos.

Análisis de la información de los pozos del G.P.A.

En el caso de la Subcuenca del Tarqui, únicamente las perforaciones del G.P.A cuentan con pruebas de bombeo, y es por este motivo que será la única fuente de información para crear el “Mapa de Caudales de Recuperación”.

En la sección de anexos se presenta la información disponible de los pozos perforados por el G.P.A. que sirven de base para la elaboración de la Tabla 10 y Tabla 11

Pozo G.P.A.	Formación	Litología	Conductividad K.
Acchayacu	Formación Mangan	Aluvial, Aglomerado Compacto con Matriz Arcillosa y Arenisca	0,014 $m/día$
Gullanzhapa	Formación Tarqui	Aluvial, Caolín Compacto, Aglomerado con Matriz Arcillosa.	0,0275 $m/día$
Chilcatotora	Formación Tarqui	Tobas Compactas, Tobas Finas intercaladas.	0,50 $m/día$
Morascale	Deposito Aluvial	Aluvial, Material Arcilloso,	0,405 $m/día$



Arenisca y Arcilla
Compacta.

Tabla 10 Análisis de la Información Obtenida de los Pozos del G.P.A -1

Pozo G.P.A.	Caudal Recuperación (lt/seg)	Profundidad Perforación (mts)	Altura (m. s. n. m.)	Altura de Perforación (m. s. n. m.)
Acchayacu	0,45	81	2.698,2	2.617,2
Gullanzhap a	0,50	99	2.751,5	2.652,0
Chilcatotor a	0,50	89	2.787,8	2.698,0
Morascalle	2,02	79	2.672,9	2.593,9

Tabla 11 Análisis de la Información Obtenida de los Pozos del G.P.A -2

Cuando revisamos la información resalta el caudal de recuperación del pozo de Morascalle, aun siendo el pozo de menor profundidad es el que mayor caudal entrega. Pero después de revisar la información completa de todos los pozos, nos damos cuenta que si bien es cierto que es el pozo de menor profundidad de perforación, en relación a la superficie, es el que está a la menor altura de perforación, considerado sobre el nivel del mar.

En base a esta información, deducimos que no es correcto hablar, en el caso de la Subcuenca del Río Tarqui de la profundidad a la cual podemos encontrar un acuífero, sino más bien la altura (m.s.n.m) a la cual puede estar ubicado. Este es uno de los referentes para tomar como criterio un Mapa de elevaciones Ilustración 3-14.

Del análisis del capítulo 7.3, tomando en cuenta la estratigrafía presente en los diversos pozos nos damos cuenta que existe un promedio de 28 metros de material aluvial, lo que disminuiría la incidencia de este tipo de material como el material de mayor recarga para dichos pozos, pudiendo establecer así una base para tomar en cuenta el resto de estratos presentes en las perforaciones y relacionarlas con los estratos de las diversas formaciones geológicas presentes en la cuenca.

Analizando las formaciones y la litología que encontramos en los pozos, dos de ellos, Gullanzhapa y Chilcatotora, descansan sobre la Formación Tarqui, y su caudal de recuperación coincide también, Acchayacu está sobre la Formación Mangan, caracterizado por arenisca, su conductividad es mucho menor, y esto se refleja también en su caudal de recuperación, que es el menor de los cuatro pozos. Por otro lado, está el pozo de Morascalle, este es el que mayor interés despierta, por su capacidad de recuperación, 2,02 lt/seg.



Metodología empleada en la Creación del Mapa de caudal de Recuperación.

A continuación se realiza una comparación (Ver Tabla 12) de la información que tenemos de la litología y la conductividad de los pozos (Barbecho & Calle, 2012) con el caudal de recuperación de cada uno de ellos.

Iniciamos ubicando los pozos que tenemos en las formaciones en las cuales se asientan, y adicionamos el caudal de recuperación que se sabe de cada pozo. Por ser el único valor conocido, para estas formaciones asumimos directamente el mismo caudal de recuperación, y adicionalmente marcamos el material que más influencia tiene en ese perfil litológico en cuanto al aporte de caudal.

FORMACIONES GEOLOGICAS	LITOLOGIA	Material Predomina en los Pozos	Conductividad Hidráulica (m/día)	Caudal Recuperación (lt/seg)	Qr Estimado por Formación (lt/seg)
Depósito aluvial	Estratos gredosos	x	1		2
Depósito Coluvial	Derrubios	x	1		2
Formación Tarqui (Pozos Gullanzhapa y Chilcatotora)	Tobas	XXX	0.001-1.101	0,5	0,5
	Arcilla				
	Caolín	XX			
	Brechas				
Formación Turi (Pozo Morascale)	Arcilla	XXX	0.014-0.5	2,02	2,02
	Arenisca				
	Lutitas				
	Conglomerados				
Formación Mangán (Pozo de Acchayacu)	Lutitas	x	0.405	0,45	0,45
	Arcilla				
	Arenisca				
	Arenisca tobáceas				
Formación Azogues	Lutitas	x	0.014-0.405		1,1
	Arenisca				
	Argilitas				



	Arcillas				
	Arenisca tobáceas	x			
Formación Loyola	Lutitas				
	Conglomerados		0.014-0.5		0
	Caliza				
Formación Quimsacocha	Lavas				
	Tobas	x	0.001		0,01
	Brechas				
Grupo Saraguro Indiferenciado	Riolita		0.001		0
	Andesita				
Formación Plancharumi	Tobas	x			
	Brechas		0.001-1.101		0,4
	Areniscas tobáceas				
Formación Quingeo	Areniscas	x			
	Lutitas		0.05		0,2
	Limolitas				
Unidad Sacapalca	Lavas				
	Brechas tobáceas				
	Conglomerado		0.001-1.101		0,5
	Lutitas				
	Tobas	x			
Formación Yunguilla	Limolitas				
	Lutitas		0.05		0,2
	Areniscas	x			
	Argilitas				

Tabla 12 Cálculo del Caudal Estimado por Formación Geológica



Para los depósitos aluviales y Coluviales, dado a su alta conductividad hidráulica y el tipo de material que le corresponde, se han considerado caudales de recuperación altos, de 2 lt/seg (cercano al máximo encontrado en Morascale).

La formación Tarqui Turi y Mangan, como se indican son las formaciones bajo los pozos conocidos, y por ese motivo se resalta el material predominante y el caudal de recuperación conocido es el estimado para toda la formación. Para las formaciones siguientes, primero se ha identificado cual es el estrato dentro de la formación en cuestión que predomine en las formaciones conocidas, y dado esto se compara las conductividades de las formaciones, y finalmente se otorga un valor de caudal de recuperación en base a este criterio.

Por ejemplo el caso del a Formación Azogues, este cuenta con areniscas y areniscas tobáceas, estos estratos están presentes en la Formación Mangan, pero también existen areniscas en la formación Turi, entonces comparamos estas tres formaciones, la conductividad hidráulica para la formación Azogues está dentro de un rango bajo, que se aproxima al rango de la Formación Turi y coincide con el valor de conductividad de la Formación Mangan, ahora podemos ver que los caudales de las dos formaciones conocidas son 2,02 y 0,45 lt/seg respectivamente. El resto de material de la Formación Azogues, es material poco permeable, en base a este análisis procedemos a dar un valor intermedio para el caudal de recuperación entre el caudal de la Formación Turi (2,02 lt/seg) y el caudal de la Formación Mangan (0,45 lt/seg). Resultando el caudal de recuperación estimado para la Formación Azogues de 1,1 lt/seg. Citamos otro caso posible, la Formación Loyola, en donde los estratos de los cuales está compuesta no son predominantes en las Formaciones donde tenemos datos, o no aparecen en las estratigrafías de los pozos, entonces la conductividad por sí sola no nos da un criterio para asignarle un valor al caudal de recuperación, por eso este valor queda sin asignar. Como vimos en 2.3.2 las calizas pueden ser un gran aporte para el agua subterránea siempre y cuando estén fracturadas, pero como no contamos con la certeza de que suceda esto en dicha formación, para efectos prácticos y crear el mapa se asumirá 0. El caso similar a este es el Grupo Saraguro Indiferenciado.

Lo siguiente, será considerar los pesos para este criterio, se debe considerar que este criterio es el más incierto, dado a que es una apreciación nuestra, aunque depende mucho de la geología, es una aproximación bastante brusca, así que a diferencia de los otros mapas, a este le daremos menor peso en general, únicamente dentro de un rango del 1 al 3. El menor peso hará que este criterio no sea tan influyente, sin embargo servirá para definir mejor las zonas para ubicar los acuíferos.

Para la determinación del peso del criterio emplearemos la siguiente formula:

$$c = 3 * f_1 * f_2$$

En donde 3, será el peso del criterio, ya se justificó esto en el párrafo anterior, los factores f_1 y f_2 son factores de minoración del criterio. El primer factor determinante será el Caudal de recuperación del pozo, se entregara un valor máximo de 1 al mayor caudal de recuperación (2,02 lt/seg) y hasta 0 para



caudales nulos, en una distribución lineal. El segundo factor se aplicara de acuerdo a la seguridad con la cual se haya establecido el primero, por ejemplo las formaciones en donde están los pozos asumirán un factor de 1, en vista de que es el único dato valido con el cual contamos, y en base al material predominante se asumen factores de valides para las otras formaciones, $f_2=0,9$ si hablamos de al menos 2 formaciones $f_2=0,5$ si el criterio se dio en base a una formación. El peso del criterio dado a cada formación geológica se muestra en la Tabla 13

FORMACIONES GEOLOGICAS	LITOLOGIA	Material Predominante en los Pozos	Qr Estimado por Formación (lt/seg)	Peso del Criterio
Depósito aluvial	Estratos gredosos	x	2	3.0
Depósito Coluvial	Derrubios	x	2	1,5
Formación Tarqui (Pozos Gullanzhapa y Chilcatotora)	Tobas	xxx	0,5	0,7
	Arcilla	xx		
	Caolín			
	Brechas			
Formación Turi (Pozo Morascale)	Arcilla	xxx	2,02	3,0
	Arenisca			
	Lutitas			
	Conglomerados			
Formación Mangán (Pozo de Acchayacu)	Lutitas	x	0,45	0,7
	Arcilla			
	Arenisca			
	Arenisca tobáceas			
Formación Azogues	Lutitas	x	1,5	2
	Arenisca			
	Argilitas			
	Arcillas			
	Arenisca tobáceas			
Formación Loyola	Lutitas		0	0,0
	Conglomerados			
	Caliza			
Formación Quimsacocha	Lavas	x	0,01	0,0
	Tobas			
	Brechas			
Grupo Saraguro Indiferenciado	Riolita		0	0,0
	Andesita			
Formación Plancharumi	Tobas	x	0,5	0,4
	Brechas			
	Areniscas tobáceas			
Formación Quingeo	Areniscas	x	0,2	0,1
	Lutitas			
	Limolitas			
Unidad Sacapalca	Lavas		0,5	0,4

	Brechas tobáceas			
	Conglomerados			
	Lutitas			
	Tobas	x		
Formación Yunguilla	Limolitas		0,2	0,1
	Lutitas			
	Areniscas	x		
	Argilitas			

Tabla 13 Peso del Criterio para cada Formación Geológica.

El mapa de caudales de recuperación se muestra en la Ilustración 3-13.

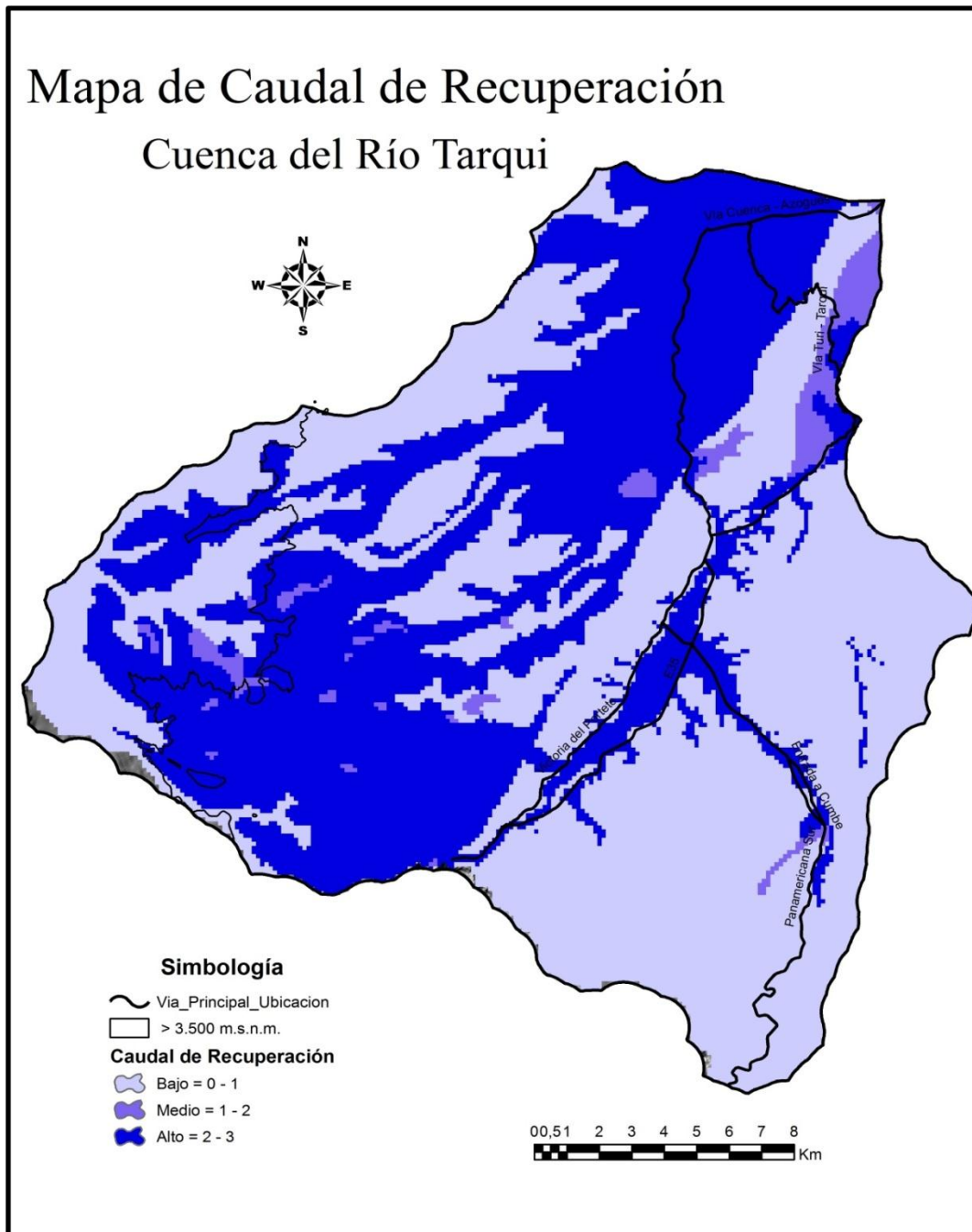


Ilustración 3-13 Mapa de Caudal de Recuperación



3.2.2.5 Mapa de Elevaciones:

Como se vio en 3.2.2 “ **Análisis de la información de los pozos del G.P.A.**”, se deduce que no es correcto hablar, en el caso de la Subcuenca del Río Tarqui de la profundidad a la cual podemos encontrar un acuífero, sino más bien la altura (m.s.n.m) a la cual puede estar ubicado. Este es uno de los referentes para tomar como criterio un Mapa de elevaciones.

Considerando también lo escrito en 2.3 , es decir, la profundidad a la que deberán hacerse las perforaciones para encontrar agua subterránea desde el punto de vista económico y sabiendo que nuestro objetivo es iniciar con una red de monitoréo, se cree más conveniente darle un mayor peso a las partes bajas de la cuenca, que es desde el punto de vista de carga hidráulica hacia donde tiende a ir el agua. Otro referente al uso de este criterio es que hacia el Oeste del área de estudio se alcanzan las mayores elevaciones, existen zonas de páramo y el parque protegido Irquis-Yanuncay, además son zonas de ser de difícil acceso.

Se ha empleado la información topográfica con curvas de nivel cada 300 metros, y se ha generado el mapa mostrado en la Ilustración 3-14, realizando una distribución lineal de pesos según la elevación.

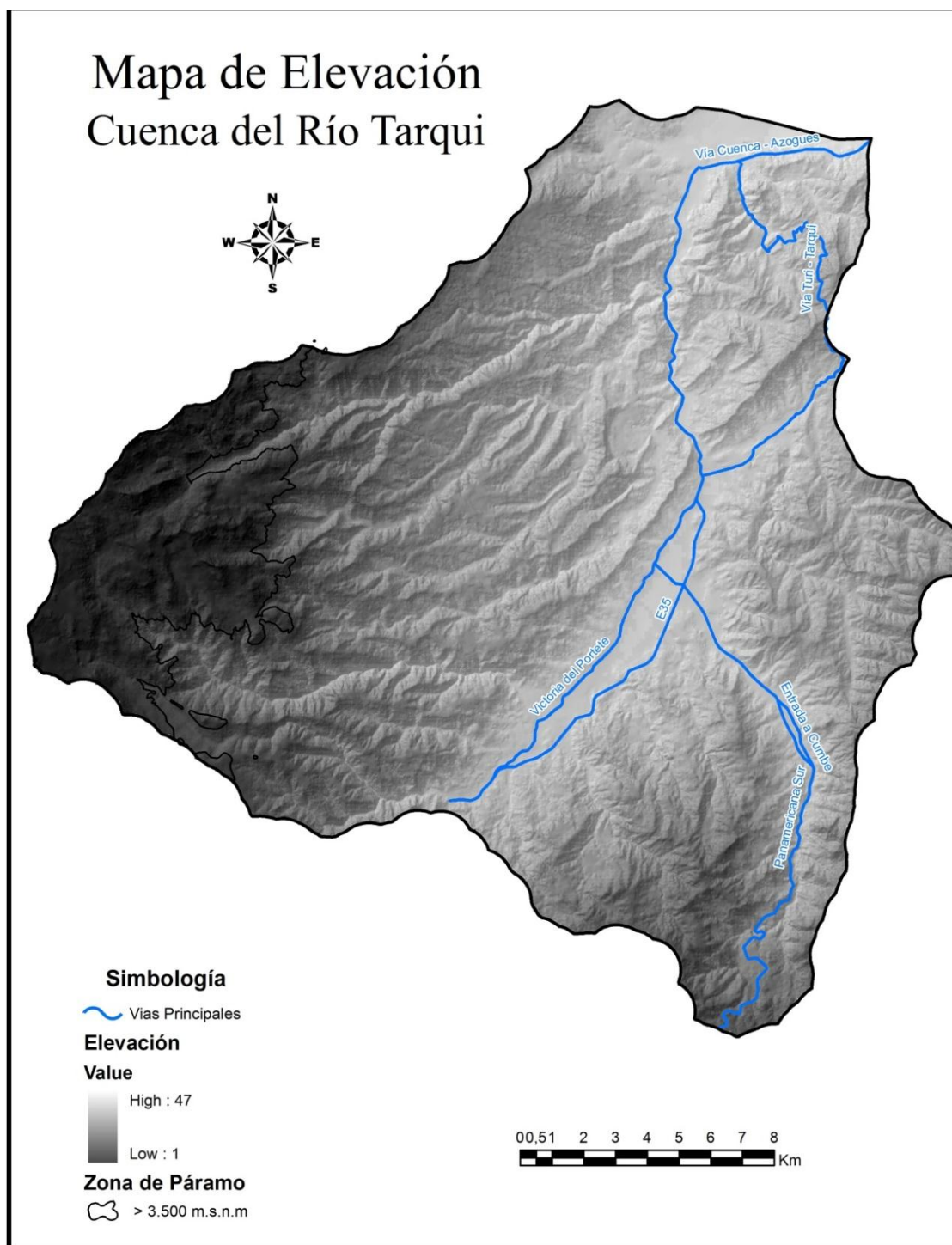


Ilustración 3-14 Mapa de Elevaciones

3.2.2.6 Mapa de Usos del Suelo:

En el Mapa de Uso del Suelo se contarán con zonas de páramo, bosques, zona urbana, etc. Es propicio el asignar un mayor peso a las zonas de páramo y bosques, ya que estos almacenan agua, permitiendo una mayor probabilidad de recarga de los acuíferos. En el caso de los páramos, estos yacen sobre roca, y tienen la característica de funcionar como “esponjas de agua”, el interés es su función de recarga, por posibles flujos de escorrentía subsuperficial, que conducen el agua hacia zonas en donde la infiltración sea mayor, evitando que

se produzca una escorrentía superficial que alimente a quebradas o ríos. El Mapa de Uso del Suelo (Ilustración 3-15), muestra el peso dado a cada uso del suelo según si retienen o no el agua.

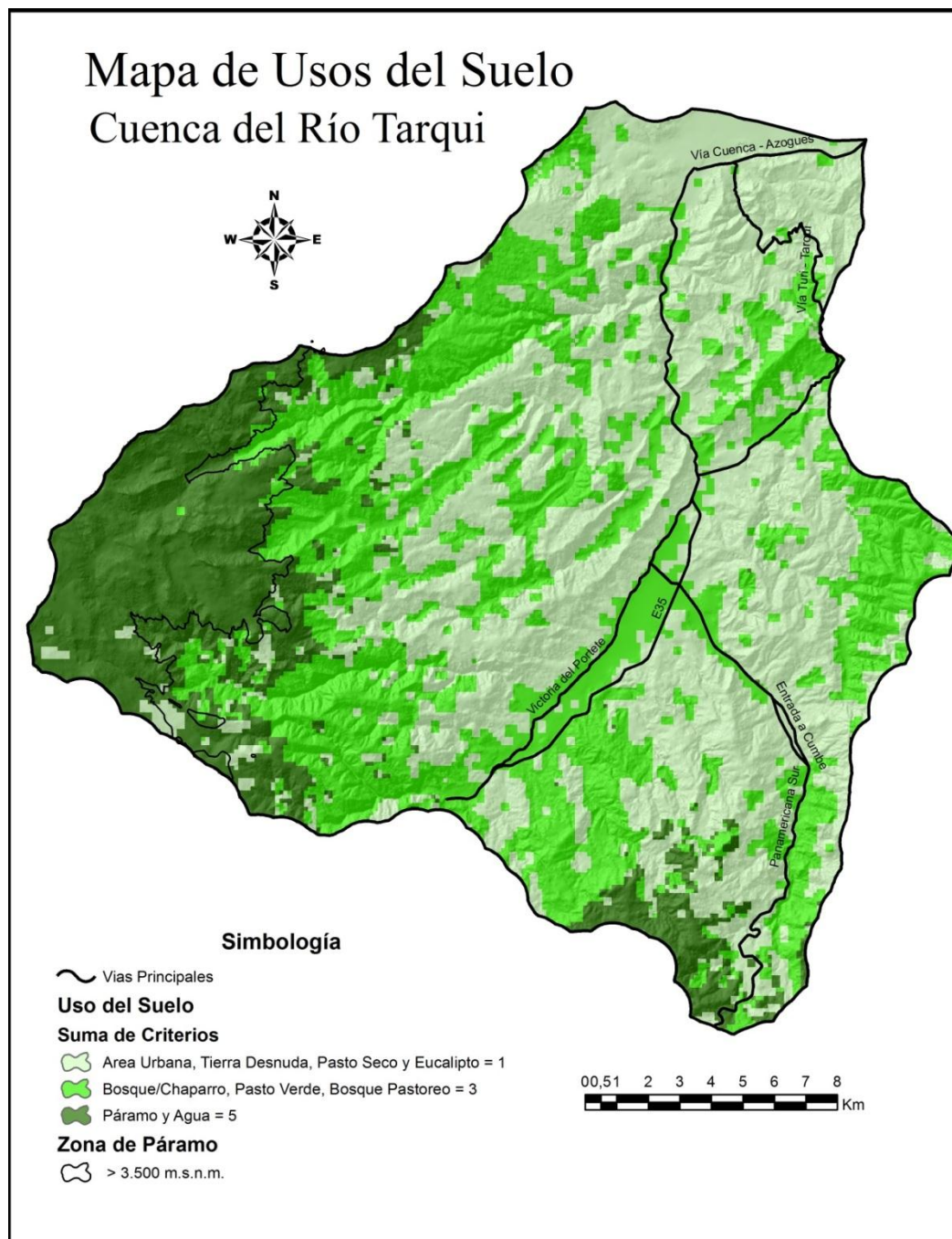


Ilustración 3-15 Mapa de Usos del Suelo

4. Resultados y Discusión.

Realizado el proceso de análisis de evaluación multicriterio, la información aparece ahora expresada en mapas cuyo significado varía según los objetivos considerados. No obstante deberá realizarse un análisis de las alternativas por su calificación en relación al objetivo, escogiendo las zonas que se acogen más adecuadamente a cada uno de ellos.

De acuerdo a lo explicado en secciones anteriores, se ha considerado los diferentes criterios para obtener dos mapas como resultado, uno de recarga y otro de ubicación de acuíferos. Estos mapas son de relevancia para nuestro principal objetivo que es la generación de un mapa con las zonas más aptas para establecer puntos de monitoreo.

Se aplicaron los mejores criterios dentro de la limitación de los datos existentes, se podrá fortalecer los resultados de esta investigación con la adquisición de nueva información de la subcuenca, pudiendo así proponer nuevas suposiciones y combinaciones multicriterio.

4.1 Mapa Multicriterio de Recarga de Acuíferos.

Para este mapa, se emplearon los criterios de precipitación, pendientes, conductividad y usos del suelo. La suma de estos criterios resulta en las zonas más favorables donde se acumula el agua y por sus condiciones, puede servir como posible recarga para acuíferos. Es importante destacar que no necesariamente la recarga del acuífero se encuentra en la misma ubicación del acuífero.

El Mapa Multicriterio de Recarga de acuíferos (Ver. Ilustración 4-1), muestra las zonas cuya suma de pesos exceden al 60% , 75% y 90% de la calificación total posible. Si observamos el mapa con calificación superior al 60 % el análisis muestra que casi toda la cuenca aporta a la recarga de acuíferos, estas zonas son muy grandes y alcanzan una baja calificación, por lo cual pierden su importancia. Al observar el mapa de zonas con calificaciones superiores al 90% resulta que son muy pequeñas las áreas de interés para recarga, haciendo los resultados poco representativos. Haciendo varias iteraciones con el afán de buscar el mapa con mayor porcentaje sobre la calificación máxima y que aporte más a nuestra investigación, se ha visto conveniente emplear el mapa con zonas que cumplan con el 75 % de la calificación total, dándonos como resultado zonas de páramo, zonas borderas al sur y oeste de la cuenca, y las partes cercanas al fondo del valle.



4.2 Mapa de Propuesta, “Ubicación de Estaciones Climatológicas”

En la Ilustración 4-2, se presenta una propuesta para la ubicación de estaciones para la medición climatológica de la Subcuenca del río Tarqui. Se ha partido de la Ilustración 4-1 analizando las zonas más importantes de la cuenca en cuanto a recarga se refiere, tomando en cuenta las estaciones de monitoreo pluviográfico, meteorológico e hidrográfico del PROMAS. Se han determinado las zonas donde se requieren la instalación de más Estaciones, como se indicó anteriormente, empleando la precipitación, pendientes, conductividad, y usos del suelo, entonces se proponen 4 zonas: la primera zona propuesta se ubica al oeste de la cuenca cerca del sector de Quimsacocha, creemos de importancia esta zona para la posible recarga de los acuíferos, y en vista de que no existen zonas cercanas que puedan aportar con datos para reforzar el estudio. También el sector sur de la Subcuenca, entre las vías principales E35 y la panamericana, esta zona está cerca de los 3.500 m.s.n.m. y en algunas zonas se evidencia terreno de paramo según se vio en el mapa de clasificación de usos del suelo, entonces también resulta de gran importancia para la base de datos de la cuenca. Después tenemos las estaciones con prioridad 3 y 4, estas cobran importancia por estar ubicadas en zonas de la cuenca en donde no se tiene nada de información. En caso de poder complementar la información actual con la última zona propuesta, los datos podrían ser afinados para un mejor resultado.

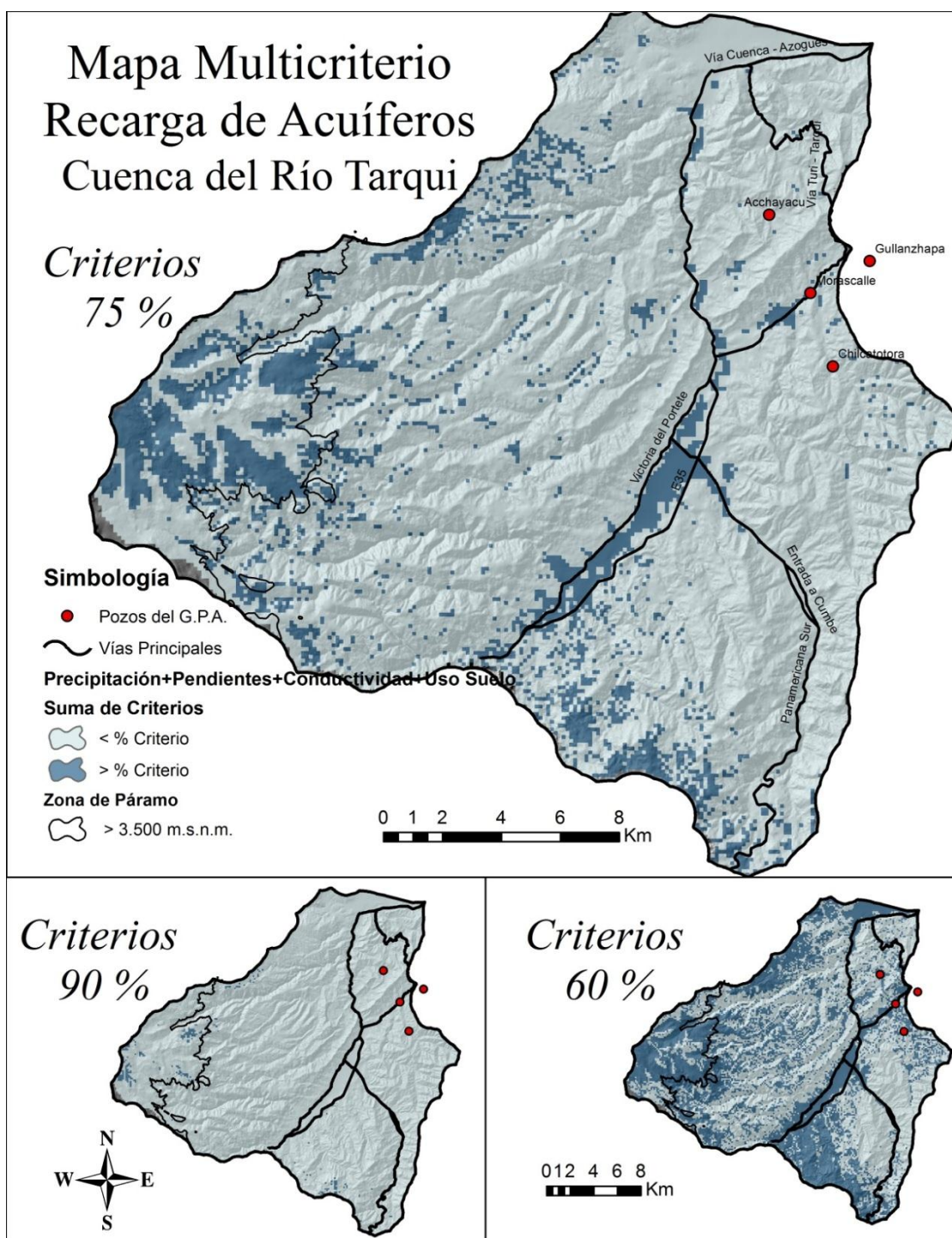


Ilustración 4-1 Mapa de Recarga de Acuíferos

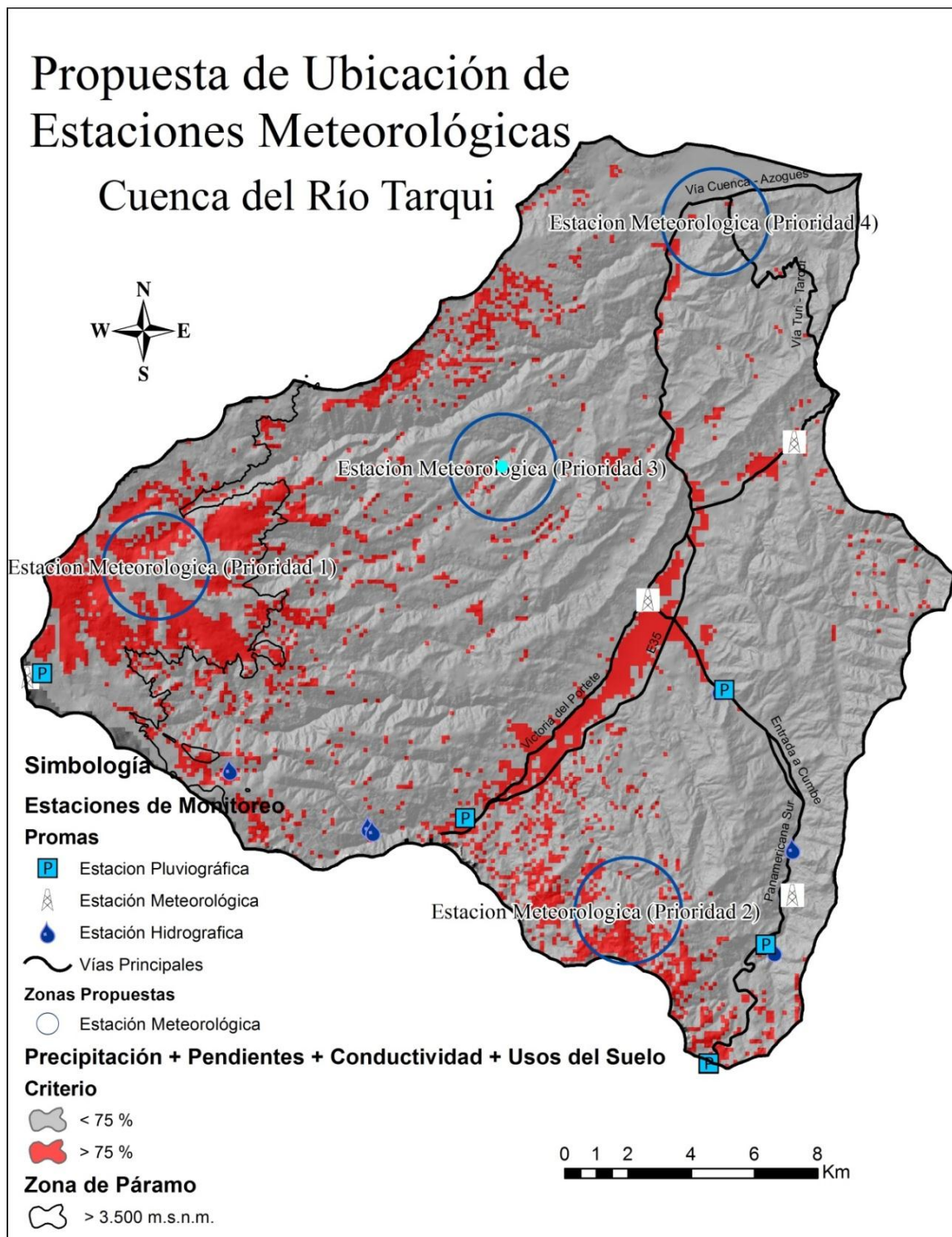


Ilustración 4-2 Mapa de Propuesta, “Ubicación de Estaciones Meteorológicas”



4.3 Mapa Multicriterio de Ubicación de Acuíferos

Los resultados (ver Ilustración 4-4) al igual que en el mapa de recarga de acuíferos, lo hemos analizado haciendo una variación de los porcentajes tomados para la suma de criterios. Para este mapa, los resultados con porcentajes altos de calificación son satisfactorios, por este motivo, se ha asumido el mapa con zonas que cumplan con un porcentaje mayor al 90% de la calificación total. El mapa Multicriterio de Ubicación de Acuíferos se muestra en la Ilustración 4-3.

En el caso citado anteriormente, la zona baja de la cuenca, cercana a “Victoria del Portete”, es una zona imprescindible para el estudio, este resultado se verifica con los afloramientos visitados en la Zona de la Merced, en donde se presentan ojos de agua, y gran cantidad de pozos artesanales, los cuales satisfacen la demanda para riego y ganado en el lugar. La zona de la Merced antes mencionada se muestra en los puntos 20,21 y 22 de la Ilustración 3-4.

Los resultados de este mapa despiertan nuestro interés en la parte norte de la cuenca. Curiosamente en la zona urbana de la ciudad de Cuenca, existe gran probabilidad de existencia de acuíferos. Al notar esto, analizamos otro pozo del Gobierno Provincial del Azuay que está ubicado en el interior del Estadio “Alejandro Serrano Aguilar”, aunque éste, se ubique fuera de la cuenca de estudio, da resultados para validar los datos obtenidos en este análisis. El caudal de recuperación de este pozo supera los 3lt/seg, incluso más alto que el pozo de Morascale. Esta zona será de gran importancia para la red de monitoreo que se plantea en la presente investigación. En cuanto al pozo de Morascale se halla al límite de las zonas encontradas como aptas para la ubicación de acuíferos, no así los pozos de Acchayacu, Clicatorta y Guyanzhapa, lo que resalta aún más los resultados obtenidos.

4.4 Mapa de Propuesta, “Ubicación de Pozos de Monitoreo”

Los Pozos de monitoreo son perforaciones que requieren un alto grado en el tiempo de trabajo, mano de obra calificada, además del elevado costo económico que representan. Sin embargo es la única forma de obtener información directa y 100% confiable de lo que está sucediendo debajo del suelo. En este mapa se proponen 3 zonas en donde se debe considerar el realizar perforaciones exploratorias con fines investigativos, sin embargo cabe resaltar que se deben realizar todos los estudios necesarios previa la perforación, se deben hacer análisis del terreno y ubicación así como sondeos geofísicos para confirmar los datos obtenidos en este documento. Dicho esto, continuamos con el análisis del mapa.

Como primera prioridad, se recomienda evaluar la zona baja de la cuenca, entre el sector de Victoria del Portete y la vía E35 después del desvío hacia



cumbe. Se ha seleccionado este sector en vista de que todos los criterios que tomamos nos apuntan hacia este lugar. Sin duda es el lugar más indicado de la cuenca para obtener agua subterránea. Cabe recalcar que aparte de un pozo – piezómetro recientemente instalado que se ubica en la intersección de la vía E35 con la Panamericana (Vía a Cumbe), no existe ningún otro material de estudio en la zona.

En segundo lugar, el mapa considera el sector del “Control Sur”, o Narancay Bajo, en la Ilustración 4-4 se ve claramente que esta zona obtiene valores altos dentro de la suma de los criterios. Creemos que este sector contiene un potencial acuífero, y sería el siguiente a estudiar dentro de la Subcuenca del Río Tarqui.

En vista de que se tendría ya cubierta la zona sur con los piezómetros de l'm Gold, y los propuestos en prioridad 1, la zona norte-este con los pozos del G.P.A y los propuestos en prioridad 2, como un complemento a la red, la zona céntrica de la cuenca podría cubrirse implementando una estación meteorológica con un pozo de exploración. Esto podría ayudar a esclarecer el comportamiento general de la cuenca, y posiblemente la esorrentía subterránea.

Insistimos, este es una planificación inicial de una Red de Monitoreo dentro de la Sub Cuenca del Río Tarqui, ya se revisó en la base teórica, que únicamente se obtendrá una idea muy general del comportamiento de la cuenca. Se debe seguir ampliando los estudios, análisis y resultados de la cuenca conforme se tengan más datos de donde sostener lo que se ha planteado. También se deberá considerar el complementar la red propuesta con estaciones de monitoreo de calidad del agua, y en el futuro plantear un modelo de flujo subterráneo que nos ayude a predecir el comportamiento general del agua subterránea dentro de la cuenca.

El establecer una red de monitoreo, es un trabajo muy extenso y costoso, sin embargo es necesario y merece iniciarse lo más breve posible para generar información que nos permitan tomar mejores decisiones en un futuro. Con esta investigación se ha creado un planteamiento muy breve de las condiciones que ratifican la presencia de agua subterránea dentro del área de estudio, lo que fortalece las acciones para continuar con todos los recursos posibles hasta llegar a obtener una red de monitoreo con el fin de complementar el estudio integral del agua tanto en calidad como cantidad.

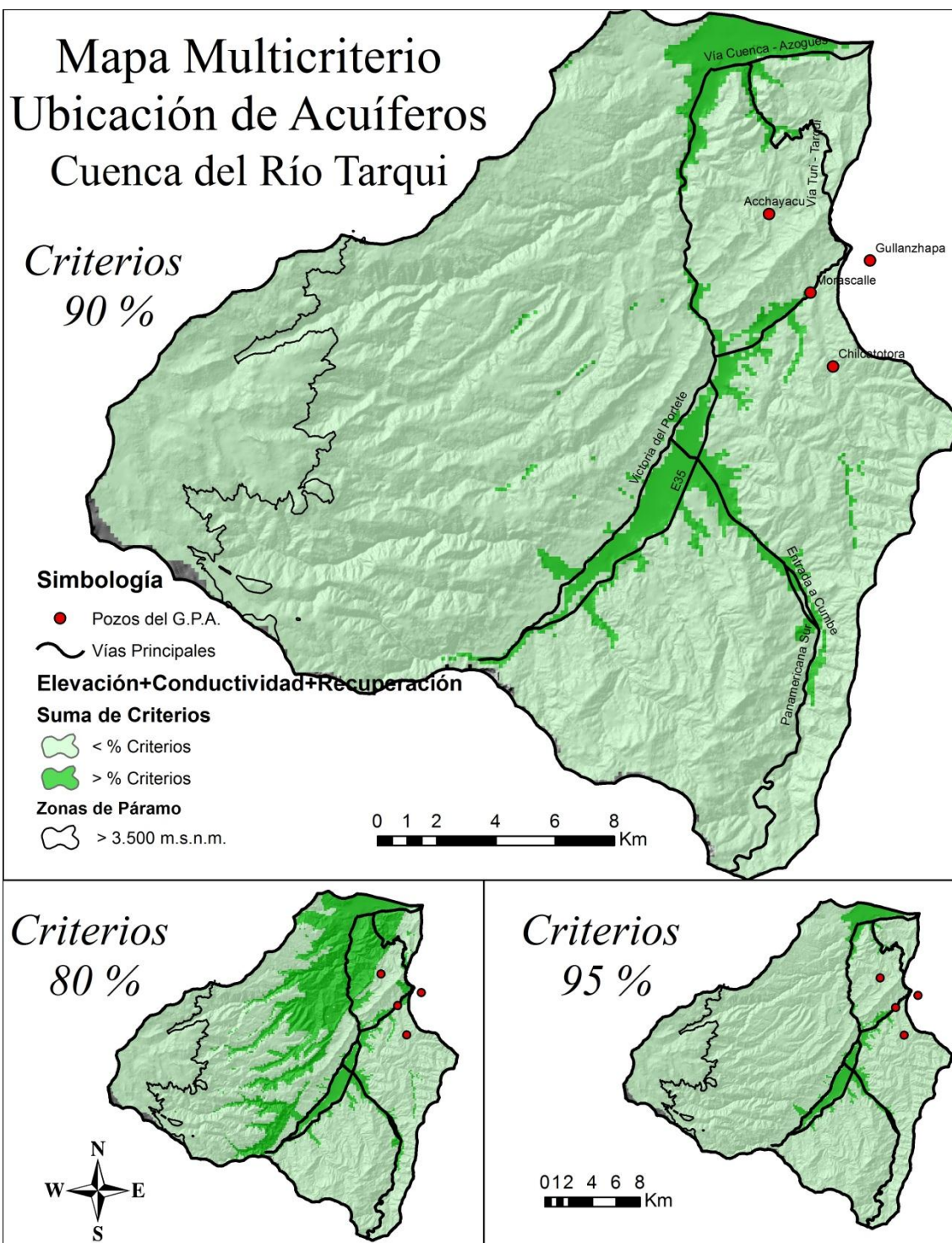


Ilustración 4-3 Mapa de Ubicación de Acuíferos

Propuesta de Ubicación de Pozos de Exploración Cuenca del Río Tarqui

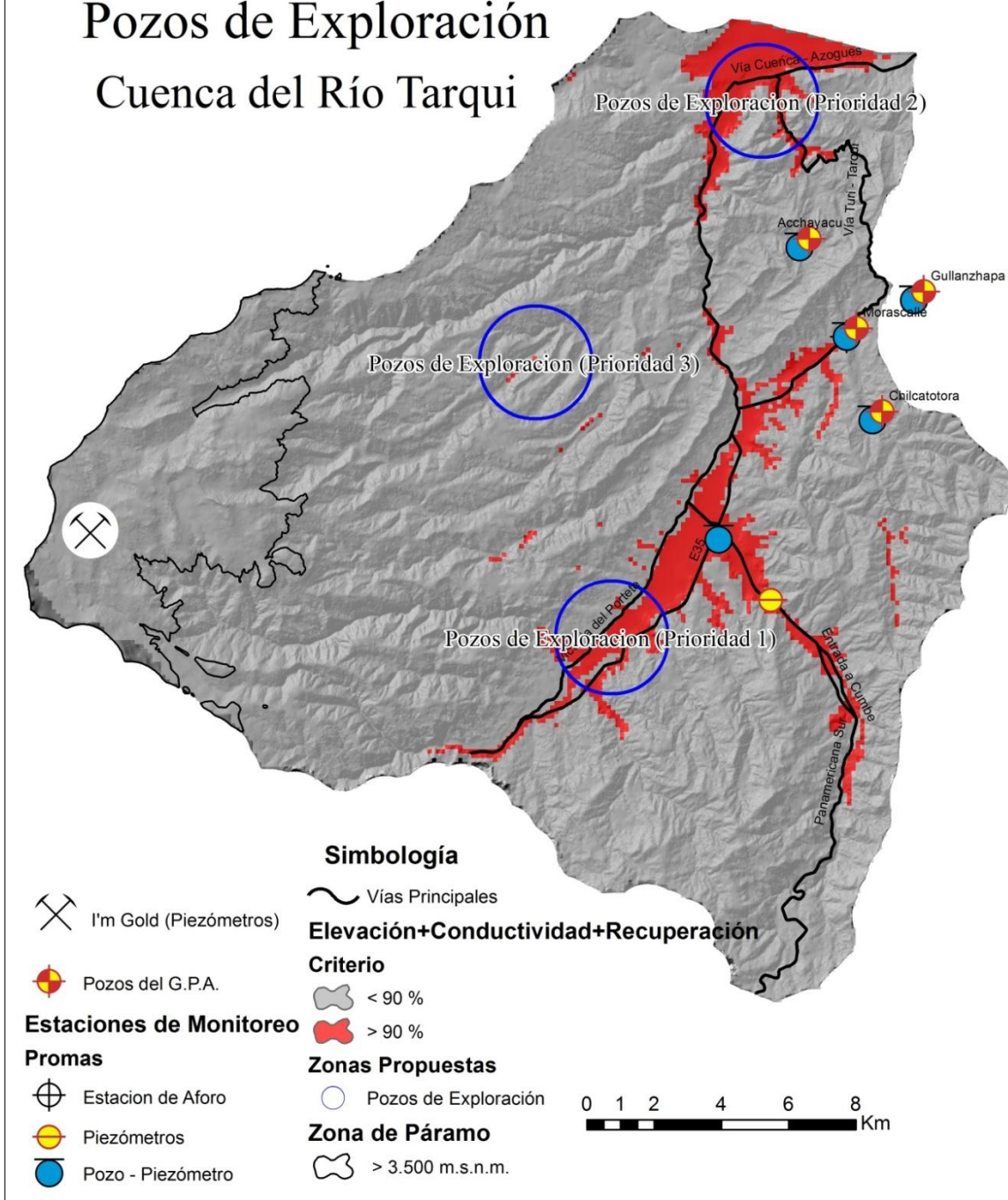


Ilustración 4-4 Mapa de Propuesta, "Ubicación de Pozos de Monitoreo"

Análisis de Alternativas - Red de Monitoréo Cuenca del Río Tarqui

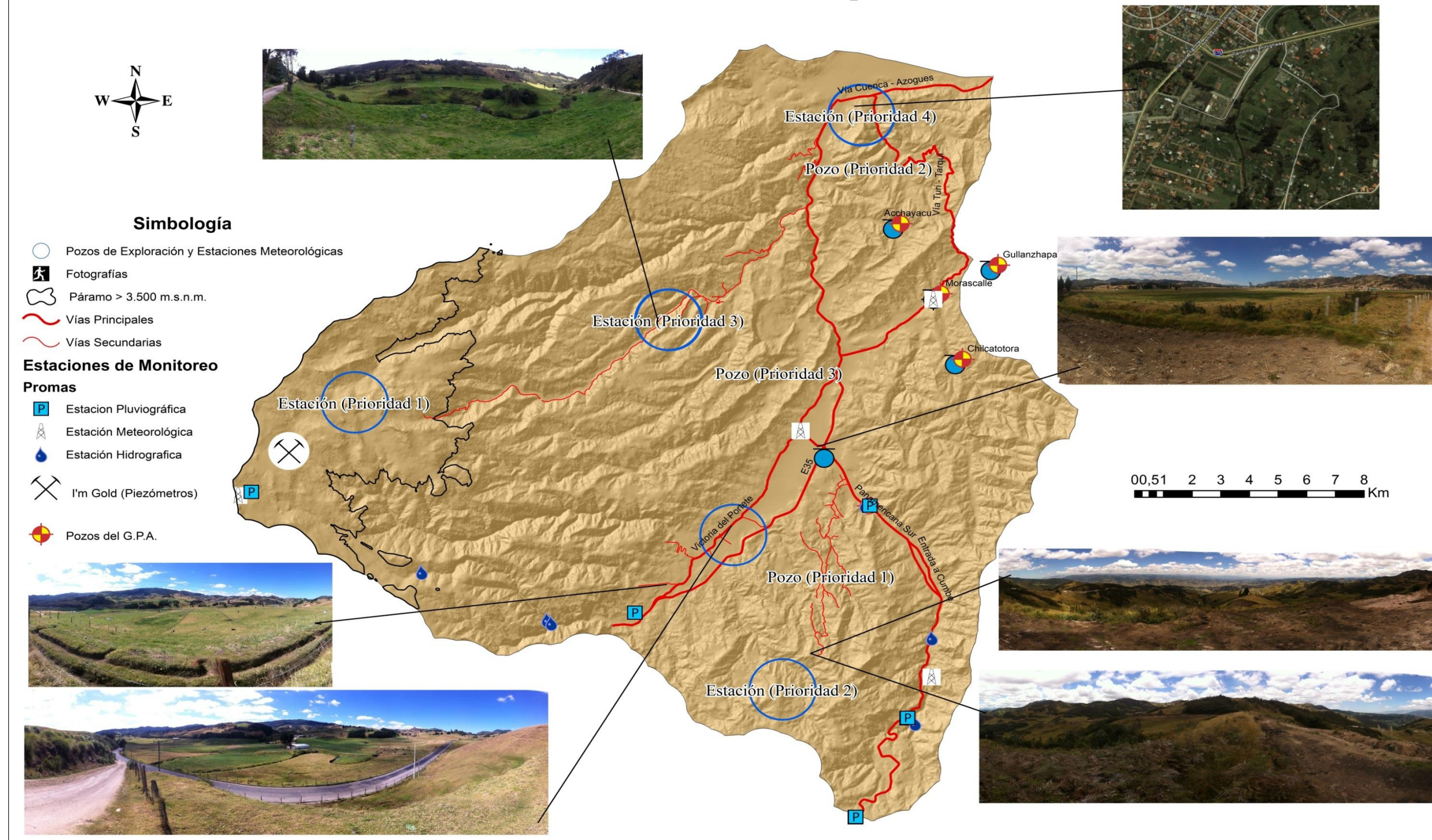


Ilustración 4-5 Análisis de Alternativas - Red de Monitoreo



4.5 Análisis preliminar de la disponibilidad de recursos hídricos en la Subcuenca del río Tarqui.

Con el fin de realzar la importancia de la implementación de la red de monitoreo, se ha realizado un ejercicio a fin de determinar preliminarmente la potencialidad de los recursos hídricos subterráneos presuntamente existentes en dicha microcuenca.

Como se ha podido observar de los estudios presentados, se puede presumir que existen en la Subcuenca al menos dos acuíferos, uno presente en el valle del río Cumbe y un segundo presente en las juntas de los ríos Tarqui y Yanuncay hacia la ciudad de Cuenca.

Haciendo una abstracción y únicamente considerando la existencia del acuífero en la parte central de la Subcuenca (Ilustración 4-6) se cuenta con un área aproximada de 19.51 km², donde podría existir agua subterránea. De las perforaciones realizadas por el G.P.A en los 4 pozos se cuenta con una potencia mínima de 25 metros del estrato aluvial, que es donde los resultados del análisis muestran la mayor presencia del acuífero. Con esto se calcula que se cuenta con un volumen aproximado de 547.5 millones de metros cúbicos de material aluvial. Si suponemos² la porosidad del estrato es del 30 por ciento, este depósito contendrá en sus poros 164.3 millones de metros cúbicos de agua.

Por otra parte, consideremos que las Subcuencas del Río Yanuncay y del río Tarqui son semejantes en área sin embargo el caudal medio de la cuenca del río Tarqui es 3.2 m³/s, y el caudal medio de la cuenca del río Yanuncay es de 6.3 m³/s, teniendo se una diferencia de caudal medio entre estas Subcuencas de 3.1m³/s (Capítulo1.1), nos hace presumir que existiría una tendencia hacia la recarga de acuíferos, aspecto que confirmaría la disponibilidad de agua referida en el párrafo presente..

Estos aspectos han sido debidamente refrendados en los resultados de los análisis realizados en el presente trabajo.

² Valor promedio tomado de varios tipos de suelos que constituyen un deposito aluvial (Espinoza, 2004)

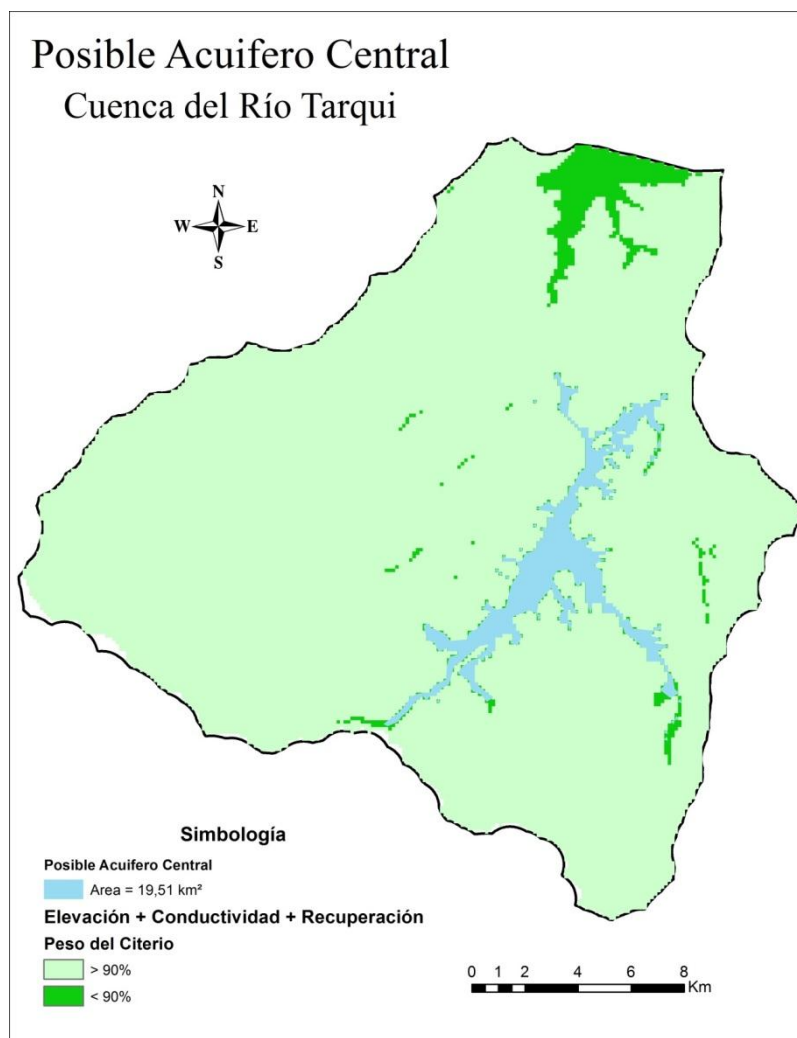


Ilustración 4-6 Mapa de Ubicación del Posible Acuífero Central



5. Conclusiones

Se logró la ubicación de zonas que presentan buenas características para implementar una red de monitoreo, con sus respectivas estaciones meteorológicas y pozos de monitoreo.

Se ubicaron sitios adecuados para el emplazamiento de las estaciones de monitoreo que conformarían una red de monitoreo de las condiciones climáticas, como se observa en la Ilustración 4-5.

La zona de exploración de “I’m Gold” cuenta con una red adecuada para el monitoreo de clima y respuesta hidrológica superficial.

Se inició la construcción de una base de datos hidrogeológicos durante el desarrollo de esta investigación, que servirá para una mejor toma de decisiones y monitoreo de la red.

Para la determinación de los costos de una red de monitoreo se deberán incluir la inversión de la propia instalación de la red, costos de muestreo, el personal involucrado, instrumentación, logística y costos de análisis de laboratorio y procesamiento de datos.

Una red de monitoreo hidrogeológica debe formar parte esencial en el manejo integral de recursos hídricos.

Debido a la poca disponibilidad de información es imperativo que a partir de la información generada en la presente tesis, emplear métodos indirectos de estudio como sondeos geofísicos, tomografías, teledetección entre otros, previo a procesos costosos de perforaciones.

Resulta indispensable realizar perforaciones con el fin de determinar con exactitud la ubicación de los acuíferos.

Se logró cuantificar preliminarmente la cantidad de recurso hídrico potencialmente disponible.

Considerando la semejanza de las cuencas de los ríos Yanuncay y Tarqui, se puede indicar que existe la probabilidad de presencia de áreas de recarga.

A pesar de contar con varios pozos de extracción de aguas subterráneas en la Subcuenca del río Tarqui, únicamente dos de los pozos cuentan con medidores de caudal.

Los resultados obtenidos en esta tesis son producto del análisis de información escasa del área de estudio, por lo que se priorizó el abordaje de los temas de cantidad para que los temas de calidad sean abordados una vez que se cuente con un modelo de cantidad adecuado.



6. Recomendaciones.

- Se deberá avanzar con el proceso del diseño e implementación de la red de monitoreo en la Subcuenca del río Tarqui, tomando en cuenta las zonas propuestas para la perforación de pozos de monitoreo.
- Se recomienda perforar en las zonas indicadas, después de corroborar la información existente con la aplicación de métodos indirectos.
- Incorporar la red de “I’m Gold” dentro de la base de datos propuesta para la red de monitoreo.
- Mantener y proyectar a futuro la base de datos iniciada en este trabajo.
- Se deberá buscar el financiamiento para el costo de implementación de la red y los rubros que implica.
- Incluir el presente tema de tesis en el manejo integral de recursos hídricos, tomando en consideración los beneficios planteados en cuanto a recursos disponibles.
- Incorporar los pozos del G.P.A. a la red de monitoreo, implementando un control de los mismos mediante hojas de campo que registren el tiempo y caudal de bombeo. Implementando medidores de caudal en los pozos que no cuenten con estos.
- Se requiere ampliar el actual estudio mediante la incorporación de análisis de calidad del agua.
- Se recomienda dividir la zona de estudio en microcuencas (Ilustración 6-1), identificando las microcuencas con mayor aporte para el acuífero para focalizar de mejor manera los recursos.

Mapa de Microcuencas Cuenca del Río Tarqui

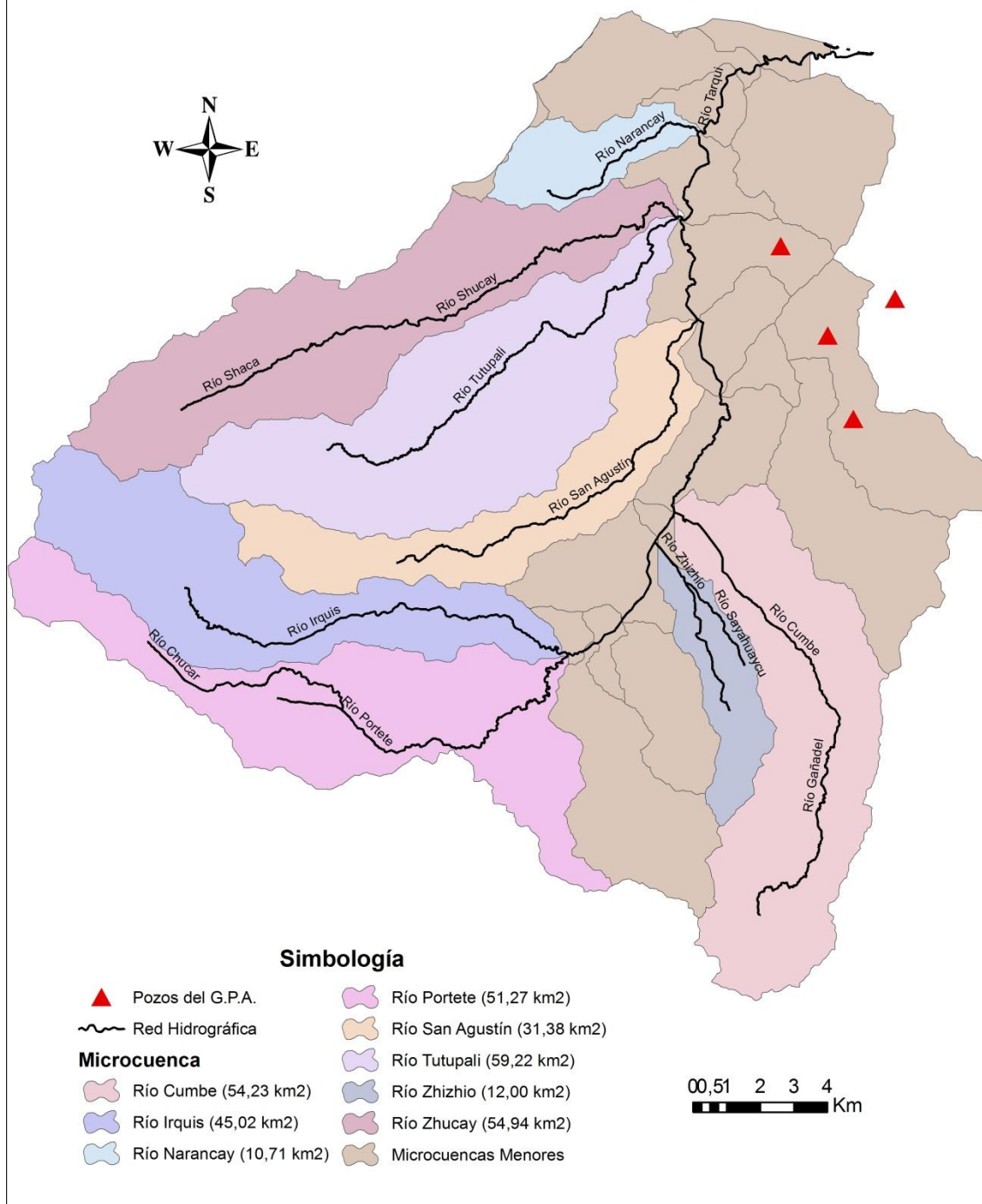


Ilustración 6-1 Microcuencas de la Subcuenca del Río Tarqui



Bibliografía

- Academies, N. (2007, September 1). Global Health and Education Foundation. National Academies. Retrieved from <http://www.drinking-water.org/html/es/Atlas/index.html?id=21>
- Barbecho, J., & Calle, J. (2012). *(EN REVISION) Caracterización de la conductividad hidráulica de los suelos en la subcuenca del Tarqui*.
- Barredo, J. I. (1996). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*.
- Britanica., M., & Minas, D. general de G. y. (1973). Mapa Geológico del Ecuador, Hoja 73 y Hoja 53.
- CELEC EP, C. E. del E. (2012). Cuenca del Río Paute. Retrieved from <http://www.celec.com.ec/hidropaute/index.php/es/cuenca-del-rio-paute>
- CG Paute, C. de G. de A. de la C. del P. (2012). Atlas de la Cuenca del Río Paute. Cuenca.
- CODIGEM, B. (1997). Mapa geológico de la Cordillera Occidental del ecuador entre 3°-4° S.
- Cathylaw.com. (2010). Cuenca Hidrologica. Retrieved from http://www.google.com.ec/imgres?q=drainage+basin&hl=es&client=firefox-a&hs=DBi&sa=X&rls=org.mozilla:es-ES:official&channel=fflb&biw=1680&bih=841&tbs=isz:l&tbm=isch&prmd=imvns&tbid=IQ3aPfLdAeG9DM:&imgrefurl=http://www.cathylaw.com/APES/Waterclassnot es.html&docid=0J8BC0-RyGdXYM&imgurl=http://prairierivers.org/wp-content/uploads/2008/08/watershed_diagram1.jpg&w=1255&h=1591&ei=V3_OT563PKL20gHpwoSLDA&zoom=1&iact=rc&dur=319&sig=107560827793915049225&page=1&tbnh=138&tbnw=108&start=0&ndsp=32&ved=1t:429
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, C. (2012). MANUAL DE Manual de Diseño de Galerías Filtrantes.
- Cisneros, F., Coello, C., & Saenz, M. (2011). Modelizacion Hidrologica Distribuida: Herramienta de soporte para la toma de desiciones para la revitalizacion Hidrologica y Forestal, en cuencas Hidrograficas Andinas., 60.
- Coronel, D. (2005). *Cuantificacion del Recurso Agua Subterranea en la Subcuenca del Rio Tarqui y Elaboracion de Sondeos Electricos Verticales*. Universidad de Cuenca.
- ETAPA, E. (2011). Plan de Manejo Integrado de Cuencas para la Protección de Fuentes de Agua - MICPA. Retrieved from http://www.etapa.net.ec/DGA/dga_pro_fue_hid_man_com.aspx



- EducaSitios. (n.d.). Distribución del agua en la Tierra. 2006. Retrieved from [http://educasitios.educ.ar/grupo096/files/Distribucion del agua.jpg](http://educasitios.educ.ar/grupo096/files/Distribucion%20del%20agua.jpg)
- Espinoza, C. (2004). Propiedades Físicas del Agua Subterranea y Acuíferos I. *Universidad de Chile*, 1–13.
- Explorock, B. de las G. y E. (2012). Roca Ignea. Retrieved September 15, 2012, from <http://explorock.wordpress.com/2012/01/10/discontinuidades-y-deformacion-de-las-rocas/>
- Geomática, U. de, & PROMAS. (2012). Mapa Geológico de la Subcuenca del Río Tarqui.
- Geosarmiento.blogspot.com. (2012). Fotografía de Mármol. Retrieved September 15, 2012, from <http://geosarmiento.blogspot.com/2010/09/album-de-minerales.html>
- Guzman, P, Batelaan, O., & Wyseure, G. (2012). Comparative analysis of base flow recession curves for different Andean catchments, 3001.
- Guzman, Pablo. (2004). *Análisis de la Dinámica de Lluvia Escorrentía en Microcuencas de Paramo*. Universidad de Cuenca.
- Guzman, Pablo. (2011). Propuesta para el Monitoreo Integral de Agua Subterranea en la Microcuenca del Río Tarqui.
- Guzman, Pablo, & Iñiguez, V. (2011). Propuesta para el Monitoreo Integral de Agua Subterranea en la Microcuenca del Río Tarqui.
- INGEOMINAS, I. C. de G. y M. (2004). *Programa de exploración de aguas subterráneas* (p. 15). Bogotá, Colombia.
- Institut d'Educació Secundaria Francesc Gil, I. (2012). Ciclo del Agua. Retrieved from <http://www.iesfrancescgil.org/fisicaiquimica/CIENCIAS PARA EL ciclo del agua.jpg>
- International Groundwater Resources Assessment Center. (2006). Guía para el Seguimiento General de las Aguas Subterráneas. *Grupo de Trabajo Internacional 1*. Retrieved from http://www.un-igrac.org/dynamics/modules/SFIL0100/view.php?fil_Id=138
- Jiménez, G., & Ocaña, O. (2000). Tratamiento con SIG y Técnicas de Evaluación Multicriterio de la Capacidad de Acogida del Territorio para usos Urbanísticos: Residenciales y Comerciales, 1509–1526.
- M. L. Keith D. (2004). *Groundwater Hydrology* (p. 90). Jhon Wiley y Sons, INC.
- MSMComunicaciones.com. (2012). DAVIS VANTAGE PRO. Retrieved August 15, 2012, from <http://www.msmcomunicaciones.com/index14.htm>
- Mate, G. W. (2002). Groundwater Management : Gestión Sustentable del Agua and Tools Conceptos y Herramientas. *Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad de agua.*, Nota 9, 1–10. Retrieved from www.worldbank.org/gwmate



- Mate, G. W. (2006). Groundwater Management : Gestión Sustentable del Agua and Tools Conceptos y Herramientas. *Caracterización de Sistemas de Agua Subterránea conceptos clave e ideas erróneas frecuentes*, Nota 2, 1–6. Retrieved from www.worldbank.org/gwmate
- Oni.escuelas.edu.ar. (2012). Suelo. Retrieved from <http://www.oni.escuelas.edu.ar/>
- Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentacion, L. (2009). *Guía para la descripción de Suelos* (p. 111). Roma. Retrieved from <http://es.scribd.com/doc/20886047/19/Clasificacion-de-las-formas-de-las-pendientes>
- Pericles, R. (2009). *Developing an Alternative Groundwater Modelling Strategy for Zones with Limited Data Availability . A Case Study of the Tarqui Catchment (Ecuador)*. Katholieke Universiteit Leuven.
- Rivas, H., Angel, J., Molina, J., & Lopez, M. (2010). *Manual de prácticas Hidrología subterránea*.
- Stephenson, D. (2003). *Water Resources Managment* (p. 113).
- Stevens Water Monitoring Systems. (1911). Retrieved from <http://www.stevenswater.com/sitemap.aspx>
- Tatoo, A. G. (2012). Conglomerado. Retrieved September 14, 2012, from <http://ec.tatoo.ws/posts/node?id=1234>
- TermoMed.net. (2011). Est. meteorológicas digitales - Davis y semiprofesionales - Davis Wireless Vantage Pro 2 Plus. Retrieved from <http://www.termomed.net/davis-wireless-vantage-plus-autoaspirada-p-881.html>
- Unidad de geomática, P. (2012). Precipitaciones medias anuales, estaciones meteorológicas.
- Universidad de Oviedo, D. de G. (2012). Escoria volcánica. Retrieved September 15, 2012, from <http://petro.uniovi.es/Docencia/myp/Macro/igneas.html>
- Universidad de Zaragoza, G. B. (2012). Caliza. Retrieved from <http://patnatura.unizar.es/m-geologia-rocas.htm>
- Vanacker, V., Molina, A., Govers, G., Poesen, J., & Deckers, J. (2007). Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropical Andean river system: The Paute River, southern Ecuador Human Impact and Geomorphology in Tropical Mountain Areas. *Geomorphology*, Vol.87(1-2, pp.53–67.
- Vintimilla, C., & Vizñay, E. (2009). *Modelacion Hidrologica y Planificacion de Recursos Hidricos de la cuenca alta del Rio Paute: Implementacion del modelo WEAP*. Universidad de Cuenca.
- Vélez Otálvaro, M. V. (2008). *Métodos para Determinar la Recarga en Acuíferos*. Universidad Nacional - Medellín.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Wheelabrator Clean Water Inc. (1975). *El Agua Subterranea y los Pozos*. (J. Screens, Ed.) (Primera Ed., p. 495).

7. Anexos

7.1 Geología e hidrogeología de la Subcuenca del Río Tarqui

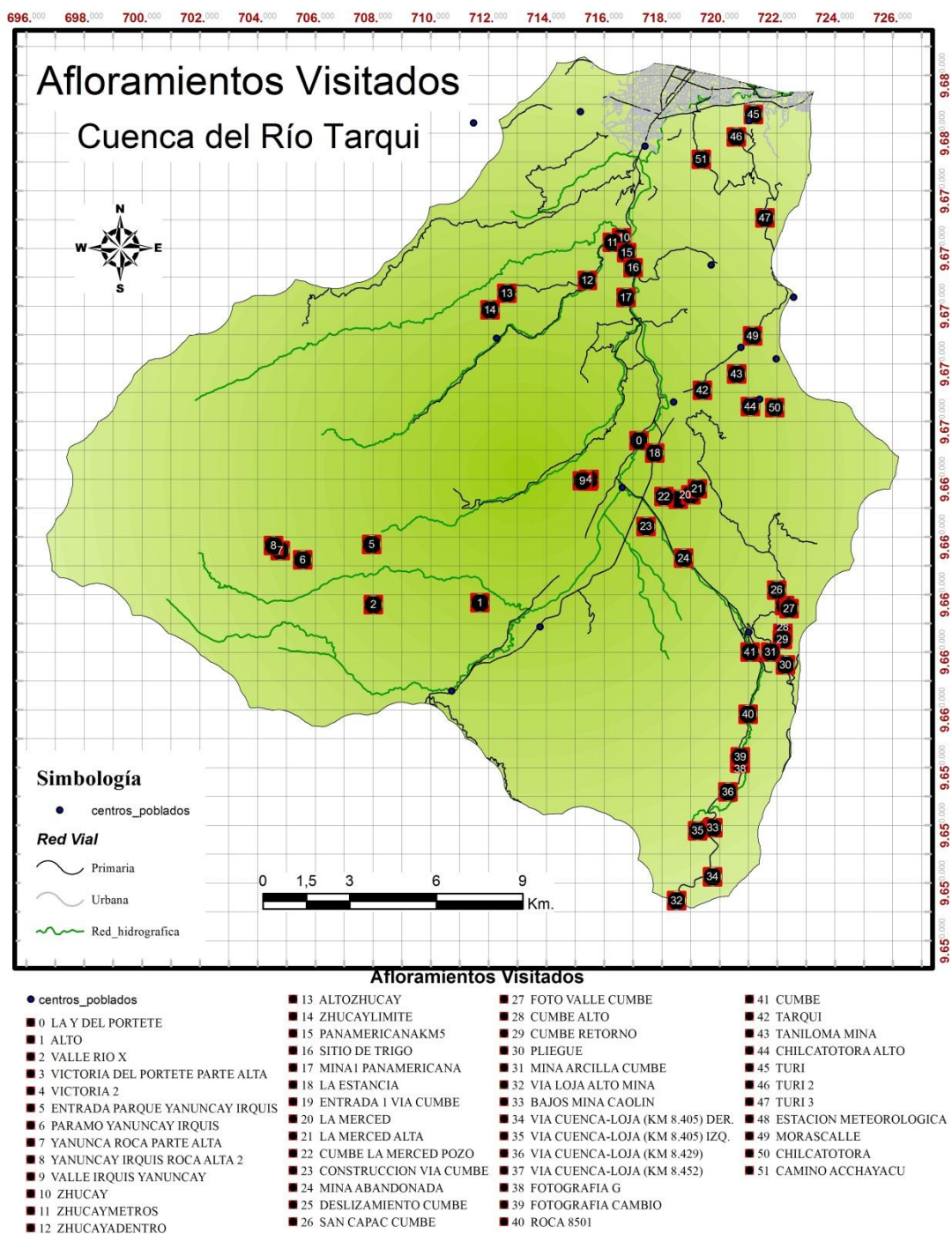


Ilustración 7-1 Afloramientos Geológicos Visitados



Los puntos visitados se pueden ver en la Ilustración 7-1, cuyas principales características se muestran en la Tabla 14. A continuación se describirá cada parada analizada, corroborada con los mapas geológicos y la ayuda de la Ingeniera Martha Roura.

Ubicación Afloramiento	Formación	Cota	Coord. X	Coord. Y	Ubicación Afloramiento	Formación	Cota	Coord. X	Coord. Y
<u>0 La Y del Portete</u>	Mangan	2.62 1	9.665.331	717.21 9	<u>26 San Capac Cumbe</u>	Yunguilla	2.92 5	9.660.156	721.985
<u>1 Alto</u>	Tarqui	2.80 7	9.659.712	711.71 1	<u>27 Foto Valle Cumbe</u>	Yunguilla	2.92 9	9.659.514	722.420
<u>2 Valle Rio X</u>	Tarqui	3.21 0	9.659.652	708.01 6	<u>28 Cumbe Alto</u>	Yunguilla	2.96 6	9.658.657	722.200
<u>3 Victoria del Portete Parte Alta</u>	Turi	2.76 7	9.663.935	715.45 8	<u>29 Cumbe Retorno</u>	Yunguilla	2.95 0	9.658.443	722.185
<u>4 Victoria 2</u>	Turi	2.79 1	9.663.995	715.48 4	<u>30 Pliegue</u>	Yunguilla	2.89 3	9.657.558	722.294
<u>5 Entrada Parque Yanuncay Irquis</u>	Turi	3.10 4	9.661.733	707.95 4	<u>31 Mina Arcilla Cumbe</u>	Yunguilla	2.81 8	9.658.005	721.777
<u>6 Paramo Yanuncay Irquis</u>	Turi	3.33 6	9.661.199	705.56 7	<u>32 Vía Loja Alto Mina</u>	Tarqui	3.41 0	9.649.385	718.523
<u>7 Yanuncay Roca Parte Alta</u>	Turi	3.37 2	9.661.526	704.79 2	<u>33 Bajos Mina Caolín</u>	Tarqui	---	9.651.912	719.774
<u>8 Yanuncay Irquis Roca Alta 2</u>	Turi	3.36 8	9.661.695	704.56 1	<u>34 Vía Cuenca-Loja (km 8.405) der.</u>	Tarqui	3.28 0	9.650.218	719.763
<u>9 Valle Irquis Yanuncay</u>	Mangan	2.81 5	9.663.939	715.25 9	<u>35 Vía Cuenca-Loja (km 8.405) izq.</u>	Tarqui	3.13 7	9.651.812	719.251
<u>10 Zhucay</u>	Turi	2.62 7	9.672.371	716.61 5	<u>36 Vía Cuenca-Loja (km 8.429)</u>	Tarqui	2.98 8	9.653.160	720.294
<u>11 Zhucay 200 metros</u>	Turi	2.60 6	9.672.211	716.29 4	<u>37 Vía Cuenca-Loja (km 8.452)</u>	Tarqui	2.92 7	9.654.155	720.708
<u>12 Zhucay adentro</u>	Turi	2.67 2	9.670.894	715.43 2	<u>38 Fotografía G</u>	Tarqui	2.86 7	9.654.145	720.724
<u>13 Alto Zhucay</u>	Tarqui	2.95 7	9.670.442	712.64 0	<u>39 Fotografía Cambio</u>	Tarqui	2.85 3	9.654.372	720.722
<u>14 Zhucay Límite</u>	Tarqui	3.02 1	9.669.871	712.06 2	<u>40 Roca 8501</u>	Yunguilla	2.84 2	9.655.845	720.999
<u>15 Panamericana a km5</u>	Turi	2.60 9	9.671.851	716.78 7	<u>41 Cumbe</u>	Tarqui	2.71 4	9.658.002	721.069
<u>16 Sitio de Trigo</u>	Turi	2.61 3	9.671.331	717.01 6	<u>42 Tarqui</u>	Tarqui	2.65 5	9.667.080	719.415

17 Mina1 Panamericana	Turi	2.62 2	9.670.293	716.76 8	43 Tañiloma Mina	Tarqui	2.65 5	9.667.643	720.601
18 La Estancia	Tarqui	2.63 9	9.664.902	717.76 4	44 Chilcatotora Alto	Tarqui	2.86 5	9.666.519	721.072
19 Entrada 1 Vía Cumbe	Tarqui	2.63 9	9.663.298	718.58 2	45 Turi	Turi	2.67 1	9.676.639	721.185
20 La Merced	Tarqui	2.74 0	9.663.454	719.01 6	46 Turi 2	Turi	2.66 2	9.675.868	720.588
21 La Merced Alta	Tarqui	2.83 5	9.663.670	719.24 2	47 Turi 3	Azogues	2.85 7	9.673.056	721.585
22 Cumbe la Merced Pozo	Tarqui	2.63 1	9.663.396	718.08 3	48 Estación Meteorológica	Turi-Coluvial	2.67 3	9.668.963	721.157
23 Construcción Vía Cumbe	Tarqui	2.64 4	9.662.362	717.46 2	49 Morascale	Azogues	2.67 3	9.668.963	721.157
24 Mina Abandonada	Deposito Aluvial-Grupo Saraguro	2.64 9	9.661.259	718.76 1	50 Chilcatotora	Tarqui	2.78 8	9.666.475	721.921
25 Deslizamiento Cumbe	Yunguilla	2.87 3	9.659.615	722.26 1	51 Camino Acchayacu	Turi	2.58 1	9.675.085	719.370

Tabla 14 Puntos Visitados en las Salidas Geológicas

7.1.1 SALIDA 1

7.1.1.1 SECTOR Y DEL PORTETE

Arenisca compacta en la parte superior, matriz arcillo- limosa, se ve permeable, clastos entre 2-40cm. La Tarqui es más permeable por la toba que la Mangan.



7.1.1.2 PARTE ALTA VICTORIA DEL PORTETE I (ALTO)

Toba de la formación Tarqui, los materiales blancos son pómez que se ha asentado y ha sido llevada por el viento. La permeabilidad es baja y la vegetación es herbácea.



Foto talud 200m más arriba



7.1.1.3 PARTE ALTA VICTORIA DEL PORTETE

Formación Turi, tiene caolín con areniscas y algo de conglomerados, el agua pasa a través de las tobas y tiene vegetación con arbustos chaparros.



7.1.1.4 VICTORIA DEL PORTETE 2

Turi con un paquete de conglomerados de 5-10cm, con presencia de arena, la Tarqui está ubicada sobre los conglomerados. Los lentes observados son de lutitas y la vegetación es herbácea con presencia de chaparros.



7.1.1.5 PARAMO YANUNCAY-IRQUIS

Presencia de arenisca de la formación Turi la cual está muy meteorizada por fuera y contiene lutitas.



7.1.1.6 ROCA PARTE ALTA YANUNCAY-IRQUIS

Andesita compacta y diaclasada, sobre una toba compacta. El material de relleno es posterior a la roca y las diaclasas le dan permeabilidad a la roca.



7.1.1.7 ROCA PARTE ALTA YANUNCAY-IRQUIS 2

Roca volcánica con andesitas de la formación Quimsacocha. La roca se encuentra muy diaclasada.



7.1.2 SALIDA 2

7.1.2.1 CASA COMUNAL ZHUCAY

Arenisca fina con carbonato de calcio y limo de la Formación Turi que comprende los estratos de lutitas, existe presencia de humedad.



7.1.2.2 ZHUCAY 200m

Formación Turi con arenisca depositada que puede ser más permeable.



7.1.2.3 ZHUCAY ADETRU

Formación Turi alterada, arenisca muy alterada y con estratos de lutitas que son más arcillo-limoso. La vegetación es pino y eucalipto.



7.1.2.4 ALTUS ZHUCAY

Formación Tarqui con presencia de pómez y arcillas rojizas. La vegetación es herbácea, zona de cultivos.



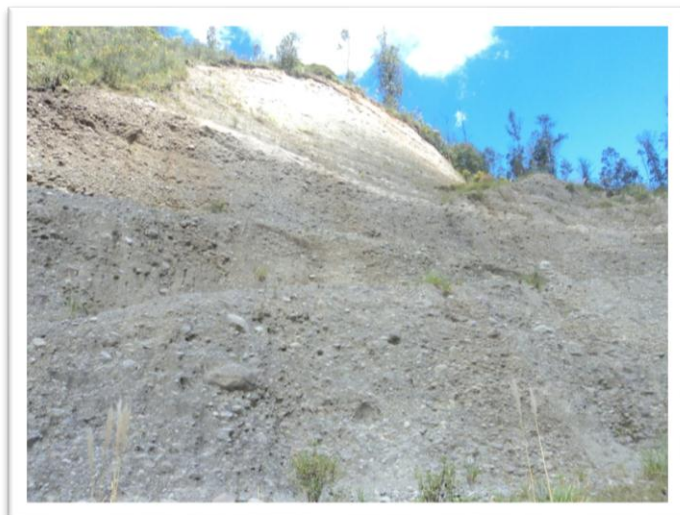
7.1.2.5 PANAMERICANA KM-5

Formación Turi con presencia de lutitas y arena bien fina.



7.1.2.6 MINA 1 PANAMERICANA

Formación Turi representada por conglomerados aproximadamente un 60% de clastos y están cubiertos por tobas de color blanco. Además un lente de arenisca separa los estratos.



7.1.2.7 PANAMERICANA KM 12+300

Tobas caoliníticas de la Formación Tarqui, alto grado de infiltración.



7.1.2.8 LA ESTANCIA

Formación Tarqui con aluvial muy fino y meteorizado, la inclinación del talud es de 80° y la inclinación de los estratos 45° en dirección de la vía.



7.1.2.9 Talud del frente

La misma Formación Tarqui solo que presenta meteorización leve.



7.1.2.10 ENTRADA 1 VIA CUMBE

Tobas blancas amarillentas de la Formación Tarqui con vegetación compuesta por pinos.



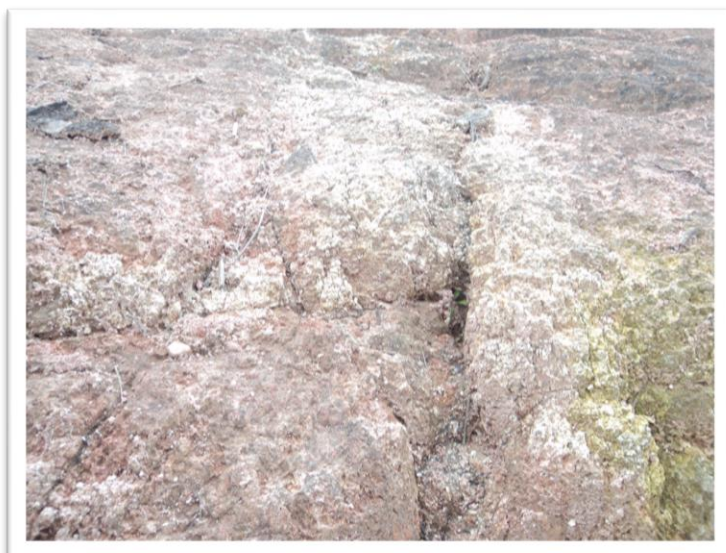
7.1.2.11 LA MERCED

Formación Tarqui con toba alterada y arcilla compacta. La zona presenta gran cantidad de ojos de agua y lagunas.



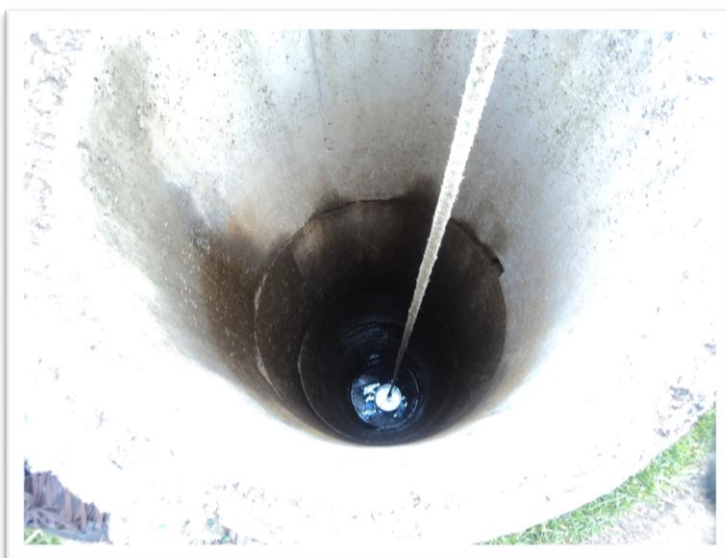
7.1.2.12 LA MERCED ALTO

Toba compacta de color rojizo y blanco. Nota se sugiere un pozo en cruce Cumbe.



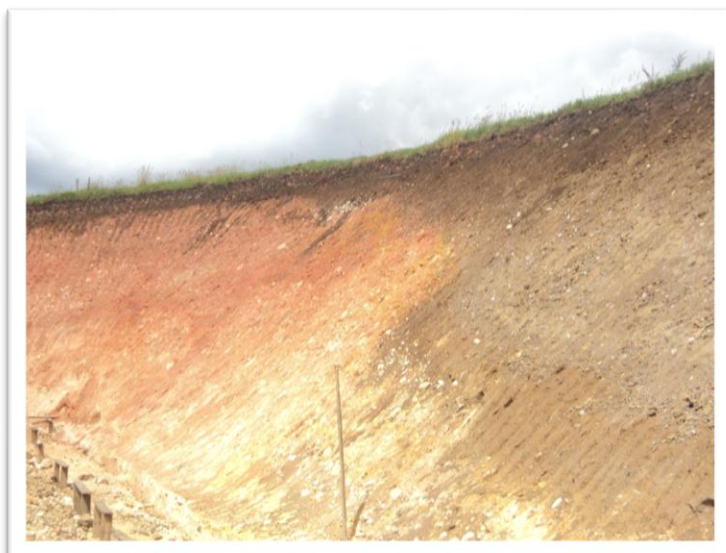
7.1.2.13 POZO CUMBE-LA MERCED

Pozo artesanal, el agua se utiliza para riego y ganado, tiene 1.2m de diámetro y aproximadamente 12m de profundidad. Toba color café de la Formación Tarqui.



7.1.2.14 CONSTRUCCION VIA CUMBE

Material arcilloso de color rojizo con tobas de la Formación Tarqui. En la parte inferior se observa la presencia de limo.



7.1.2.15 MINA ABANDONA VIA CUMBE

Puede ser la Tarqui pero poco meteorizada con presencia de caolín.



7.1.2.16 ZONA DE DESLIZAMIENTOS DE CUMBE

Pertenece a la Formación Yunguilla con argilitas meteorizadas de color gris oscuro, es una zona de deslizamientos que existe presencia de agua.



7.1.2.17 SAN CAPAC-CUMBE

Argilitas meteorizadas de color rojo amarillento tiene bastante permeabilidad por que se halla muy fracturado.



7.1.2.18 CUMBE ALTO

Argilitas meteorizadas color café oscuro. Los deslizamientos en la parte baja del Cumbe hacen pensar que puede existir escorrentía subterránea.



7.1.2.19 CUMBE RETORNO LA FLORESTA

Yunguilla con areniscas de color café amarillento, está muy compactada por lo tanto tiene baja permeabilidad. El material es conocido como ceraturo por los habitantes del sector y se emplea para la fabricación de adobe.



7.1.2.20 PLIEGUE CUMBE

Presencia de un pliegue sinclinal y anticlinal, el material está compuesto por una arenisca diaclasada, se presume un flujo preferencial en la estructura del pliegue.



7.1.2.21 PLIEGUE CUMBE 100m ADELANTE

Se compone del mismo material que del pliegue anterior.



7.1.2.22 MINA DE ARCILLA

Yunguilla con argilitas en la parte media del talud y arcilla roja que se usa para fabricar cerámica, una potencia aproximadamente de 50m.



7.1.3 SALIDA 3

7.1.3.1 VIA LOJA-ALTO MINA (MINA DE CAOLIN)

Formación Tarqui con presencia de caolín, con alto grado de compactación, el material está muy diaclasado y se fractura fácilmente.



7.1.3.2 BAJOS MINA CAOLIN

Formación Tarqui con presencia de varios minerales y caolín, el. Tiene óxido de hierro es por ello que presenta un color rojo en algunas partes del talud.



7.1.3.3 Material de la parte superior del talud



7.1.3.4 VIA CUENCA-LOJA (KM 8.405)

Talud derecho suelo arcilloso brechificado de la Formación Tarqui y presenta un alto grado de consolidación.



Talud izquierdo es una arcilla con iguales características a la parada 2.



7.1.3.5 VIA CUENCA-LOJA (KM 8.429)

Caolín de la Formación Tarqui, poca probabilidad de permeabilidad, se puede decir que tiene un grado de consolidación alto.



7.1.3.6 VIA CUENCA-LOJA (KM 8.452)

Matriz arcillosa con presencia de cuarzo, es una roca (lutita) sobre la cual se asienta un conglomerado de matriz arcillosa con incrustaciones de cuarzo. Presenta poca probabilidad de infiltración. Taquí solo que menos meteorizada.



7.1.3.7 FOTOGRAFIA G (KM 8.465)

Tarqui con presencia de tobas.



7.1.3.8 FOTOGRAFIA CAMBIO (KM 8.467)

Formación Tarqui de color blanco muy consolidada (caolín) y amarillo en la parte superior.



7.1.3.9 PANORAMICA CAMBIO DE LITOLOGIA (KM 8.501)

Se observa en las fotos las litologías descritas en las 2 últimas paradas, su ubicación panorámicamente.





7.1.3.10 KM 8.501

Yunguilla con argilitas negras, muy diaclasada



7.1.3.11 CUMBE (KM 8.525)

Tarqui consolidada blanco amarillenta, contiene brechas con clastos angulares están meteorizados, tobas amarillentas compactas y no aparece en el mapa porque es un afloramiento pequeño.



7.1.3.12 TARQUI (KM 8.648)

Tobas blancas amarillentas y rojizas de la Formación Tarqui.

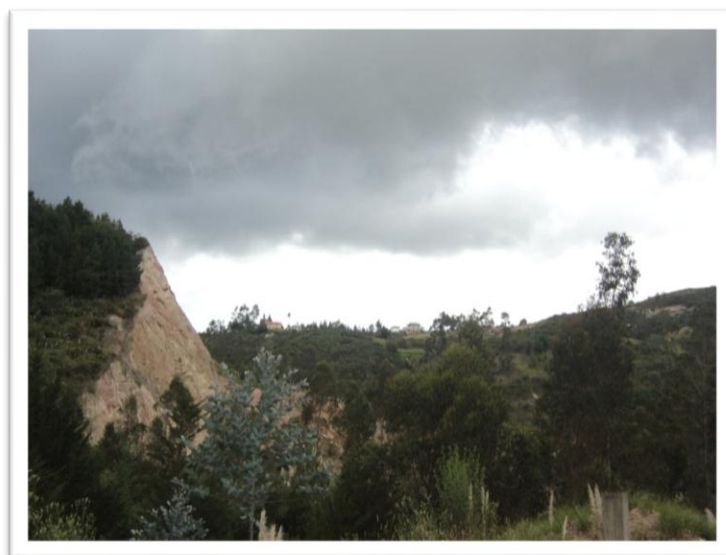


7.1.3.13 TAÑILOMA (MINA GPA)

Tarqui con incrustaciones de cuarzo, en el talud del frente se observa la misma litología.

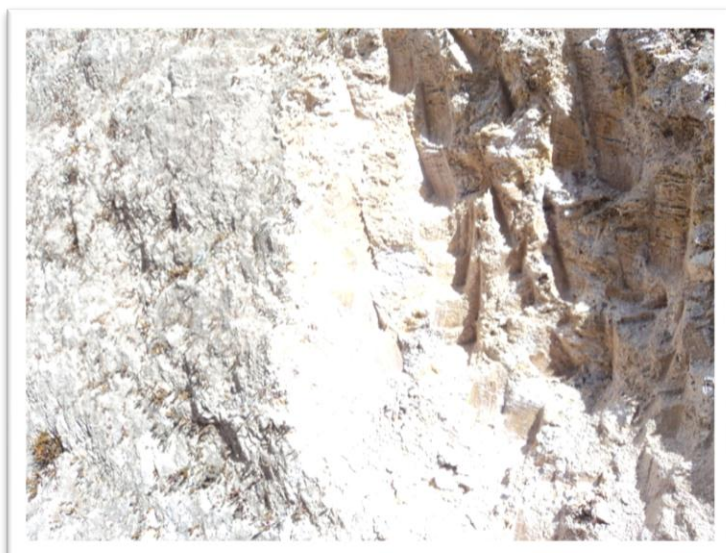


7.1.3.14 Talud del frente



7.1.3.15 CHILCATOTORA ALTA

Tarqui con tobas blanco amarillentas.



7.1.3.16 Contacto entre arenisca y arcilla.



7.1.4 SALIDA 4

7.1.4.1 TURI

Turi arenisca brechoide por los clastos angulares y varía entre 3mm-1cm con matriz arenosa, presenta baja permeabilidad es muy consolidado.



7.1.4.2 TURI 2

Turi con arenisca fina estratificadas y consolidadas, se encuentra diaclasado.



7.1.4.3 TURI 3

Azogues con lutitas matriz arcillo limosa de color amarillento (la foto es del material exterior meteorizado).



7.1.4.4 ESTACION METEOROLOGICA

Deposito Coluvial con presencia de vegetación en la parte superior y en la parte superior Formación Turi con presencia de lutitas.



MORASCALLE

Arenisca compactada color blanco amarillento se encuentra diaclasada y presenta vegetación herbácea es de la Formación Azogues.



7.1.4.5 CHILCATOTORA

Tarqui con tobas amarillentas y Depósito Coluvial.



7.1.4.6 CAMINO ACCHAYACU

Conglomerados del depósito coluvial y en la parte inferior estratos de arcilla y arenisca de la Formación Turi.



7.2 Fuentes de información disponibles en la Subcuenca del Río Tarqui.

En la Tabla 15; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se realiza un breve listado de las fuentes de información correspondiente a aguas subterráneas a nivel de la Subcuenca del Río Tarqui, las cuales han sido nuestro punto de partida para el desarrollo de esta tesis.

Sector	Administrador	Descripción	Altura GPS (m)	Norte (m)	Este (m)	Sist. Coord.
Tarqui	ETAPA	Est. Meteorológica	2627,96	9663956,29	716523,71	WGS84
Vía Cuenca-Loja	PROMAS	Est. Pluviográfica	3418,60	9649274,92	718433,46	WGS84
Cumbe	PROMAS	Piezómetros	2664,45	9661106,24	718899,04	WGS84
Cumbe	PROMAS	Hidrográfica Aforo	2652,96	9661077,50	718800,31	WGS84
Morascalle	PROMAS	Est. meteorológica	2672,64	9668963,22	721157,16	WGS84
Morascalle Río La Compañía	PROMAS	Aforo	2672,64	9668963,22	721157,16	WGS84
Morascalle Quebrada	PROMAS	Aforo	2672,64	9668963,22	721157,16	WGS84
Morascalle	PROMAS_GPA	Pozo-piezómetro	2672,64	9668963,22	721157,16	WGS84
Chilcatotora	PROMAS_GPA	Pozo-piezómetro	2787,84	9666474,52	721921,42	WGS84
Acchayacu	PROMAS_GPA	Pozo-piezómetro	2698,21	9671627,08	719756,18	WGS84
Gullanzhapa	PROMAS_GPA	Pozo-piezómetro	2751,57	9670050,74	723162,44	WGS84
Vía Cumbe F. GUZMAN	PROMAS	Pozo-piezómetro	2633,68	9662918,91	717341,51	WGS84
Vía Cuenca-Loja	PROMAS	Est. Pluviográfica	2999,49	9653034,99	720240,21	WGS84
Vía Cuenca-Loja 2	PROMAS	Est. Meteorológica	2869,95	9654604,83	721096,20	WGS84
Cumbe Alto	PROMAS	Est. Hidrográfica	2874,00	9652856,82	720523,42	WGS84
Cumbe Medio	PROMAS	Est. Hidrográfica	2732,00	9656103,5	721106,9	WGS84



				2	3	
Cumbe Bajo	PROMAS	Est. Hidrográfica	2644,00	9661145,5 2	718804,2 5	WGS84
Canal1	PROMAS	Est. Hidrográfica	2651,00	9661137,3 2	718791,1 5	WGS84
Canal2	PROMAS	Est. Hidrográfica	2652,00	9661130,3 2	718780,1 5	WGS84
P. Alto	PROMAS	Est. Pluviográfica	3418,00	9649288,4 3	718444,2 1	WGS84
P. Medio	PROMAS	Est. Pluviográfica	3005,00	9653053,3 2	720254,7 2	WGS84
P. Bajo	PROMAS	Est. Pluviográfica	2663,00	9661122,1 2	718938,3 5	WGS84
Portete Medio	PROMAS	Est. Hidrográfica	2904,00	9658599,3 7	703296,1 6	WGS84
Portete Bajo	PROMAS	Est. Hidrográfica	2889,00	9656784,3 6	707682,1 5	WGS84
Portete Bosque	PROMAS	Est. Hidrográfica	2876,00	9656664,3 6	707821,1 5	WGS84
Portete	PROMAS	Est. Pluviográfica	2740,00	9657052,3 5	710735,1 5	WGS84
Estación Cumbe	PROMAS	Est. Climática	2874,00	9654606,4 6	721097,8 5	WGS84
IFS II Clima	PROMAS	Est. Climática	3829,00	9661503,3 7	696890,6 5	WGS84
IFS II Humedad1	PROMAS	Humedad	3815,00	9661346,5 2	696990,3 0	WGS84
IFS II Humedad2	PROMAS	Humedad	3794,00	9661447,2 9	697120,9 7	WGS84
IFS II Humedad3	PROMAS	Humedad	3805,00	9661578,6 6	697050,1 3	WGS84
IFS II H-P-C	PROMAS	Humedad Pluviógrafo Hidrografía	3750,00	9661641,5 5	697345,2 1	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3764,00	9664109,0 0	698350,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3769,00	9663191,0 0	698660,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3809,00	9663192,0 0	698556,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3805,00	9662888,0 0	698788,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3766,00	9663518,0 0	698591,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3748,00	9663483,0 0	698700,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3752,00	9663753,0 0	698530,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3769,00	9663246,0 0	698612,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3762,00	9663602,0 0	698493,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3753,00	9663958,0 0	698367,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3753,00	9663798,0 0	698511,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3797,00	9662976,0 0	698633,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3740,00	9664036,0 0	698644,0 0	WGS84
Quimsacocha	I'm Gold	Piezómetro	3742,00	9664040,0 0	698635,0 0	WGS84

Tabla 15 Ubicación de las Fuentes de Información.



7.3 Presentación y Análisis de la información de los pozos del G.P.A.

En esta sección se presenta la información con la cual se cuenta de pozos de agua subterránea en la Subcuenca. Los siguientes datos son producto de la digitalización y ordenamiento del registro del G.P.A. en adición al trabajo realizado en la tesis en revisión de Conductividad Hidráulica por Barbecho and Calle (2012). La información disponible de Ím GOLD S.A Ecuador dispone de la información estratigráfica de las perforaciones realizadas en Quimsacocha, mas no presenta información en cuanto a caudales de extracción se refiere, ya que se realizaron con el objetivo de colocar piezómetros. La información estratigráfica de estas perforaciones se empleó como información base para hallar el mapa de conductividad como lo menciona (Barbecho & Calle, 2012).

En el caso de la Subcuenca del Tarqui, únicamente las perforaciones del G.PA cuentan con pruebas de bombeo, y es por este motivo que será la única fuente de información para crear el “Mapa de Caudales de Recuperación”.

Esto nos motiva a estudiar más a detalle este sector; los cuatro pozos están muy cercanos entre sí, y sus valores de recarga varían significativamente con respecto del pozo de Morascale, en donde la recuperación es mayor. A continuación se describirán cada uno de los pozos existentes en el área de estudio.

Pozo de Acchayacu.

Está ubicado en la comunidad de Acchayacu a 5,3km de la ciudad de Cuenca y a 2.698,2 m.s.n.m. el pozo alcanza una profundidad de 81m, según las pruebas de bombeo realizadas por el G.P.A, el caudal de recuperación es $Q_r=0,45$ lt/seg. En la Ilustración 7-2 podemos ver la estratigrafía a lo largo del pozo.

El pozo de Acchayacu está ubicado sobre la Formación Mangan. Los autores determinan una conductividad $k=0,014$ m/día para esta formación en función de sus estratos más permeables.

PROFUNDIDAD (m)		POTENCIA (m)	LITOLOGIA
24		24	Aluvial
79		55	Aglomerado compacto de matriz Arcillosa
81		2	Arenisca

Ilustración 7-2 Litoestratigrafía Interpretada para el Pozo de Gullanzhapa (Barbecho & Calle, 2012)

Pozo de Gullanzhapa.



A 8,3 km de la ciudad de Cuenca y a pocos metros de la comunidad de Gullanzhapa, encontramos este pozo a 2.751 m.s.n.m. perforado por el G.P.A. alcanza una profundidad de 99 metros, y según las pruebas de bombeo realizadas por el Gobierno Provincial del Azuay, tiene un caudal de recuperación $Q_r=0,50$ lt/seg.

Este pozo se encuentra sobre la formación Tarqui. Se ha tomado la Litoestratigrafía de (Barbecho & Calle, 2012) mostrada en la Ilustración 7-3, en la cual se puede ver que predomina el caolín compacto y el aglomerado compacto con matriz arcillosa, que definen la conductividad hidráulica de $k=0,0275$ m/día.

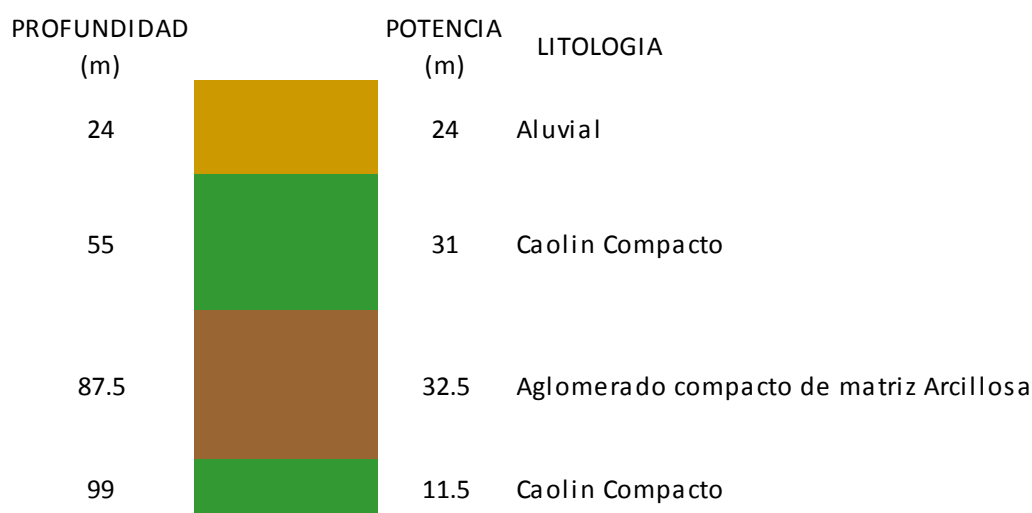


Ilustración 7-3 Litoestratigrafía Interpretada para el Pozo de Gullanzhapa (Barbecho & Calle, 2012)

Pozo de Chilcatotora.

El pozo de Chilcatotora está ubicado cerca de la comunidad que lleva el mismo nombre, y a 10,8 km de la ciudad de Cuenca. Ubicado a una altura de 2.787 m.s.n.m. su perforación alcanza los 89m. Según pruebas de bombeo realizadas por el G.P.A. el caudal de recuperación de este pozo es $Q_r= 0,50$ lt/seg. Y su conductividad es $k=0,02$ /día, está dada por su estrato más permeable, Tobas Finas. El pozo de Chilcatotora, se encuentra sobre la formación Tarqui, al igual que el pozo anterior.

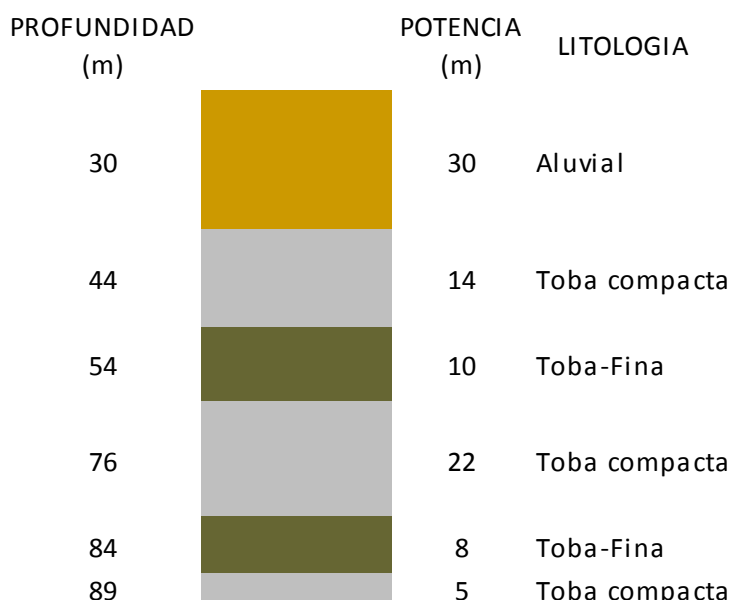


Ilustración 7-4 Litoestratigrafía Interpretada para el Pozo de Chilcatotora (Barbecho & Calle, 2012)

Pozo de Morascale.

Lleva su nombre por la comunidad de Morascale, ubicada cerca del pozo, este se encuentra a 8,3 km de la ciudad de Cuenca y a una altura de 2.672,9 m.s.n.m. es el pozo con mejor rendimiento en las pruebas de bombeo, posee un caudal de recuperación $Q_r=2.02$ lt/seg. Sin embargo es el menos profundo alcanzando 79 metros de profundidad. Su estrato más permeable, y el que determina su conductividad $k=0,405$ m/día. Es la Arenisca.

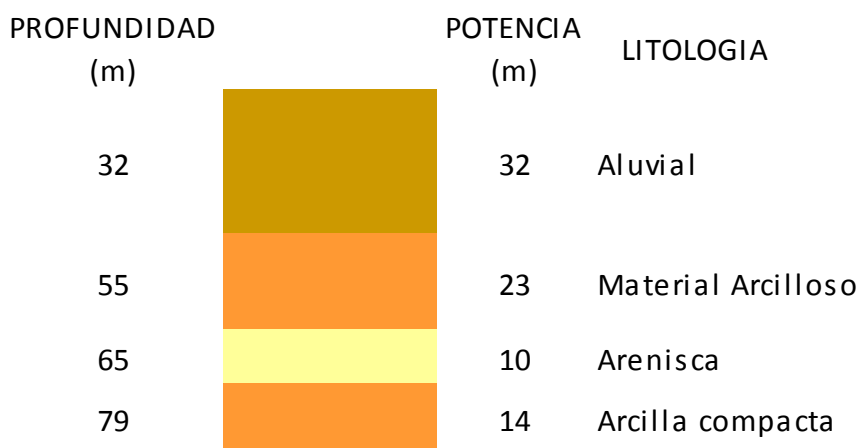


Ilustración 7-5 Litoestratigrafía Interpretada para el Pozo de Morascale (Barbecho & Calle, 2012)

El pozo de Morascale se encuentra sobre un depósito aluvial, el cual consiste en estratos gredosos supra yacientes a un depósito de roca gruesa, y depósitos de arena.