

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE UNA TERRAZA FLUVIAL DEL
RÍO TAHUANDO MEDIANTE EL ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO Y
ESTRATIGRÁFICO, IBARRA, IMBABURA.**

Autores: Génesis María Mero García
Lennin Israel Villegas Pérez

Director del Trabajo de Titulación: PhD. James Rodríguez

Comité Lector:

MSc. Oscar Rosales

MSc. Gladys Yaguana

MSc. Paúl Arias

2017

Lugar de la Investigación: Terraza fluvial del río Tahuando

Beneficiarios: Comunidad científica

HOJA DE VIDA



APELLIDOS: Mero García

NOMBRES: Génesis María

C. CIUDADANIA: 092893626-9

TELÉFONO CONVENCIONAL: -

TELEFONO CELULAR: 0981675127

Correo electrónico: genelexa94@gmail.com

DIRECCIÓN: Ibarra, Priorato, Barrio El Olivo, Av. 17 de Julio.

AÑO: 19 de octubre de 2017

HOJA DE VIDA



APELLIDOS: Villegas Pérez

NOMBRES: Lennin Israel

C. CIUDADANIA: 100370444-0

TELÉFONO CONVENCIONAL: (06)2 933391

TELEFONO CELULAR: 0982450222

Correo electrónico: lennisisrael_19@hotmail.com

DIRECCIÓN: Ibarra, San Antonio, Barrio Bellavista, Calle 28 de septiembre.

AÑO: 19 de octubre de 2017

Registro Bibliográfico

MERO GARCÍA GÉNESIS MARÍA, VILLEGAS PÉREZ LENNIN ISRAEL.

Caracterización hidrogeológica de una terraza fluvial del río Tahuando mediante el estudio sedimentológico y estratigráfico, Ibarra, Imbabura/ TRABAJO DE GRADO. Ingenieros en Recursos Naturales Renovables Universidad Técnica del Norte. Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Ibarra. EC. octubre 2017. 118 p.

DIRECTOR:

El objetivo de este estudio fue evaluar las características hidrogeológicas de una terraza fluvial del río Tahuando mediante el estudio sedimentológico y estratigráfico para la comprensión de la estructura interna de los acuíferos. Se utilizó la metodología establecida por Miall (2006), que consiste en el levantamiento de columnas estratigráficas en campo y su posterior descripción y análisis en gabinete. Los depósitos encontrados dentro de la terraza son materiales siliciclásticos de origen fluvial, lacustre y principalmente piroclásticos. Dentro de la terraza fluvial se representa un flujo segmentado por la composición de sedimentos que denotan un bajo porcentaje de permeabilidad en la misma.

Ibarra, 19 de octubre de 2017

.....
PhD. James Rodríguez
Director

.....
Mero García Génesis María
Autora

.....
Villegas Pérez Lennin Israel
Autor

1. RESUMEN

El agua subterránea que se encuentra en los acuíferos proporciona alrededor del 50% de agua potable a la población mundial. El mal manejo que se da a estos acuíferos ha generado la contaminación y escasez de las fuentes de agua subterráneas; por tanto, es importante realizar estudios que aporten conocimiento para realizar una correcta gestión de los mismos. La terraza fluvial sobre la que se asienta la ciudad de San Miguel de Ibarra está constituida por depósitos fluviales y volcánicos con una elevada porosidad, que les hace idóneos para comportarse como acuíferos. Una cantidad considerable del agua utilizada en la ciudad de Ibarra proviene de un acuífero desarrollado en los depósitos que constituyen la terraza fluvial. El conocimiento que se tiene del subsuelo de la ciudad es escaso, no obstante, los escarpes presentes en los flancos de la quebrada excavada por el río actual constituyen una excelente oportunidad para estudiar sus características geológicas. En este estudio se realizó una caracterización sedimentológica y estratigráfica de estos depósitos fluviales con el fin de evaluar la geometría, orientación y organización espacial de las diferentes unidades hidrogeológicas. El levantamiento de columnas estratigráficas se realizó rotulando las litologías presentes en los estratos de los afloramientos de la terraza fluvial, y aplicando el método de Miall (2006) se identificaron un total de quince litofacies, las cuales definieron cuatro hidrofacies para fines hidrogeológicos. Conjuntamente se tomaron numerosas fotografías para ejecutar los paneles fotográficos, que fueron

estudiados con detalle y basados en información bibliográfica, determinaron que los depósitos de la terraza fluvial son en su mayoría de tipo piroclástico debido a la actividad continua del volcán Imbabura durante el Holoceno, con breves episodios de sedimentación fluvial. El estudio de las características sedimentológicas y estratigráficas de la terraza fluvial de la ciudad de Ibarra permite un mejor entendimiento de los patrones de flujo y heterogeneidades del acuífero aportando conocimiento del sistema hidrogeológico regional, además de constituir un buen análogo para comprender la estructura interna de otros acuíferos desarrollados en depósitos fluviales.

SUMMARY

Groundwater found in aquifers provides about 50% of drinking water to the world's population. Mismanagement of these aquifers has led to pollution and the scarcity of groundwater sources; therefore, it is important to carry out studies that contribute with the knowledge to carry out a correct management of the same. The river terrace where the city of San Miguel de Ibarra lay down is made up of fluvial and volcanic deposits with a high porosity, which makes them suitable to behave like aquifers. A considerable amount of water used in the city of Ibarra comes from an aquifer developed in the reservoirs that constitute the fluvial terrace. The knowledge of the subsoil of the city is scarce, however, the slopes present in the flanks of the creek excavated by the present river offer an excellent opportunity to study its geological characteristics. In this study, a sedimentological and stratigraphic characterization of these fluvial deposits was performed to evaluate

the geometry, orientation and spatial organization of the different hydrogeological units. The survey of the stratigraphic column was performed by labeling the lithologies present in the strata of the fluvial terrace outcrops and, using the method of Miall (2006), fifteen lithologies were identified, which defined four hydrofacies for hydrogeological purposes. Numerous photographs were taken to execute the photographic panels, which were studied in detail and based on bibliographical information, determined that the deposits of the fluvial terrace are mainly of pyroclastic type due to the continuous activity of the volcano Imbabura during the Holocene, with brief episodes of sedimentation of rivers. Study of the sedimentological and stratigraphic characteristics of the fluvial terrace of the city of Ibarra allows a better understanding of the flow patterns and heterogeneities of the aquifer, contributing with the knowledge of the regional hydrogeological system, being a suitable analogue to understand the internal structure of other Aquifers developed in river reservoirs.

2. INTRODUCCIÓN

Una cantidad considerable del agua utilizada en la sociedad es extraída del subsuelo desde acuíferos, esta desempeña un rol importante para el bienestar de la humanidad y el funcionamiento de los ecosistemas, ya que además de suministrar con agua potable al menos al 50% de la población mundial, contribuye de manera significativa para la solución de los problemas de hambruna en épocas de escasez debido a su uso para el riego (Llamas y Martínez, 2004). La extracción del agua subterránea sin control puede producir un riesgo a la

disponibilidad de esta para la población y los ecosistemas, causando un importante impacto para el hombre y la economía (UNESCO, 2015).

La escasez o contaminación de los acuíferos en los países en vías de desarrollo afectan de manera relevante a la población de bajos recursos, ya que no son capaces de encontrar fuentes de agua alternativas, mientras tanto en los países desarrollados la importancia de las aguas subterráneas reside en que son el sustento económico de estos, sobre todo por su utilidad para las industrias (Kemper, 2004). Por consiguiente, la caracterización hidrogeológica de los acuíferos es un requisito primordial para cualquier plan de gestión de las aguas subterráneas (Anderson y Woessner, 1992). Dada esta consideración es esencial comprender la dinámica de la circulación del agua subterránea, así como la geometría, organización y características petrológicas de las unidades litológicas que forman el reservorio de agua (Huggenberger y Aigner, 1999).

Parte de los pozos de donde se extrae el agua que abastecen a la ciudad de San Miguel de Ibarra se encuentran dentro de la zona de acumulación del sistema hidrogeológico regional, unidad Ibarra, aportando un estimado del 43,37% de agua a la población (EMAPA-I, 2017). El presente trabajo se basa en el estudio de los rasgos estratigráficos y sedimentológicos de los sedimentos fluviales que constituyen el subsuelo de la ciudad, esto permitirá identificar y describir las unidades geológicas que almacenan el agua, además de conocer los patrones de flujo

subterráneo y las heterogeneidades dentro del mismo.

En la actualidad existe información general de la geología de esta región situada al N y NE del Volcán Imbabura, en especial de los depósitos volcánicos (Pennec *et al.*, 2011), sin embargo, no se ha llevado a cabo ningún estudio en detalle sobre los depósitos fluviales superficiales asociados a las terrazas del río Tahuando cercanos a la ciudad de Ibarra, los cuales tienen una importante representación por la información relevante que aportan a fin de realizar la caracterización hidrogeológica de la terraza fluvial.

Los depósitos volcano-sedimentarios que constituyen la terraza sobre la que se encuentra la ciudad de Ibarra son depósitos de edad Cuaternaria, que están constituyendo una potente y extensa terraza en este tramo del río Tahuando. Este tipo de formaciones presentan características de porosidad y permeabilidad que les hacen idóneas para la circulación de fluidos a través de ellas (Beres, Huggenberger, Green, & Horstmeyer, 1999; Klingbeil, Kleineidam, Asprion, Aigner, & Teutsch, 1999; Zappa, Bersezio, Felletti, & Giudici, 2006).

3. MATERIALES Y METODOS

En el tramo del río Tahuando al Este de la ciudad de San Miguel de Ibarra se determina como representativa la terraza fluvial ubicada en el kilómetro 1 de la vía Ibarra – Tulcán (Panamericana 35), barrio el Olivo. Las coordenadas UTM son: (X: 821004, Y: 10039811; X: 821456, Y: 10039773).

Estos afloramientos son óptimos para describir las características estratigráficas y sedimentológicas de los depósitos fluviales que constituyen las terrazas del río Tahuando cercanos a la ciudad, en éstos se determinan los rasgos hidrogeológicos, mismos que servirán como información preliminar para comprender el comportamiento de acuíferos presentes en el sector.



Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio

Elaboración: Autores

3.1. Identificación de litofacies e hidrofacies, arquitectura estratigráfica de los depósitos fluviales y su evolución.

Los afloramientos se deben cartografiar sedimentológicamente por estudios de campo y dibujos a mano tomando en cuenta la geometría de los depósitos (Pryor, 1973, Bluck, 1979), mediante la conformación de paneles fotográficos de los afloramientos (Fraser y Cobb, 1982; Thompson, 1983, Jussel, 1992, Jussel *et al.*, 1994), o dibujado a partir de películas de laca (Basumallick, 1966). En las secciones que se trabaja con georadar se interpretan con la ayuda de fotografías de afloramientos (Huggenberger *et al.*, 1994, Asprion y Aigner, 1997; Asprion, 1998).

En las secciones que se realizan con georadar es posible detectar las superficies erosionales y separar elementos arquitectónicos, sin embargo, la resolución en estas secciones todavía no es suficientemente alta como para detectar cambios en el tipo de litofacies (Asprion, 1998).

Las fotografías deben ser captadas con una cámara de alta resolución en posición vertical apoyada en un trípode y utilizando un filtro central para compensar la diferencia de brillo, o a su vez ser tomadas en días con un cielo cubierto de nubes, ya que cualquier luz solar directa puede ocultar fácilmente algunas estructuras en sombras oscuras (Klingbeil *et al.*, 1999).

Para la digitalización y construcción de la base de datos se utiliza el software Illustrator como apoyo, mismo que permite la digitalización en pantalla como arcos de erosión o superficies delimitadoras entre diferentes elementos arquitectónicos y tipos de litofacies. Siguiendo este procedimiento, la topología se construyó mediante la conexión de superficies limitadas individuales a polígonos de características similares, los cuales se marcan con IDs de acuerdo con sus tipos de litofacies (Klingbeil *et al.*, 1999).

El levantamiento de columnas estratigráficas en campo consiste en la descripción detallada de láminas, estratos y facies de un corte longitudinal del área de estudio; los datos que se deben tomar son medidas de espesor de la capa y de cantos representativos en ella, posteriormente estos se rotulan en una hoja de papel milimetrado para representar litologías, contactos, estructuras sedimentarias,

contenidos fosilífero o color de los depósitos.

En la estratigrafía y sedimentología, la documentación metódica de la litología, el tamaño de los granos, la compactación, el lecho, las estructuras sedimentarias y las secuencias son la base de las descripciones de las litofacies. Este concepto ha demostrado ser considerablemente potente en el análisis de una amplia gama de depósitos según el método de Miall (1996), con la aplicación de su código

3.2. Caracterización hidrogeológica de los depósitos fluviales.

Apoyados en el análisis de Klingbeil *et al.*, (1999) (ver Anexo 3), a cada condición litológica establecida se le asignará una hidrofacies de acuerdo a los criterios de conductividad hidráulica. Se tomará en cuenta los valores de las conductividades horizontal y vertical para determinar las características hidrogeológicas, en caso de no contar con el valor de conductividad de algún tipo de facie, esta puede ser determinada teniendo en cuenta valores tomados en depósitos similares dentro del área de estudio.

A partir de los paneles de facies se realizan paneles de hidrofacies en los que se visualiza la geometría y orientación de las diferentes unidades hidrogeológicas, realizando equiparaciones con los datos propuestos por los autores (Klingbeil *et al.*, 1999; Webb y Anderson, 1996). Esto servirá para predecir los patrones de flujo del agua y las heterogeneidades del depósito.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Sedimentología y estratigrafía

La sucesión estratigráfica de esta terraza del río Tahuando, con un espesor mayor a los 30 m, está constituida por materiales siliciclásticos de origen fluvial, lacustre y volcánico (Figura 2). Esta se ha dividido en 7 unidades sedimentarias. El espesor total de la sucesión disminuye hacia el O, hacia la margen izquierda del río Tahuando, acompañado por el acuñamiento de algunas de las unidades (Figura 2).

Los depósitos de la terraza descansan sobre una potente unidad de brechas matriz-a grano-soportadas interpretada como un *debris avalanch* procedente desde el sur, formado a partir de colapsos del complejo volcánico Imbabura, su edad aproximada es Pleistoceno superior 43 ka BP (Le Pennec et al., 2011). La sucesión de la terraza comienza con un tramo de hasta 2 m de espesor formado por arcillas laminadas de color blanco a marrón claro (unidad I; fig. 2) que recubren las brechas inferiores. Estas arcillas presentan algunas intercalaciones de láminas de hasta 1 cm de espesor de sedimentos orgánicos y restos vegetales flotados. En ellas son frecuentes las intercalaciones de estratos tabulares de hasta 15 cm de espesor formados por líticos o pumita de menos de 2 cm de tamaño, grano-soportadas libres de matrices masivas o gradadas.

La unidad II se caracteriza por presentar secuencias granodecipientes de hasta 1,5 m de espesor, con bases erosivas formadas por conglomerados organizados y bien clasificados hacia la base, que pasan hacia techo a

arenas o arenas conglomeráticas con estratificación cruzada en surco. Las secuencias finalizan con arenas finas con *ripples* asimétricos de corriente y *climbing ripples*. También aparecen canales de más de 30 m de ancho y hasta 5 m de espesor. Su relleno muestra una secuencia granodeciciente formada por conglomerados con clastos hasta de 50 cm, masivos en la base del canal sobre los que aparece superficies de acreción lateral y estratificación horizontal. Esta unidad presenta un espesor mínimo de 5 m y se solapa hacia el O sobre la unidad infrayacente hasta desaparecer.

La Unidad III presenta un espesor aproximado de 13 m en la margen O del río (sección 3; fig. 2) y se adelgaza hasta los 4,5 m hacia el E (sección 1; fig. 2). Su límite superior está definido por una superficie erosiva y su sucesión estratigráfica está formada por materiales piroclásticos de color blanco a gris claro formados por cenizas, lapilli, aglomerados y brechas.

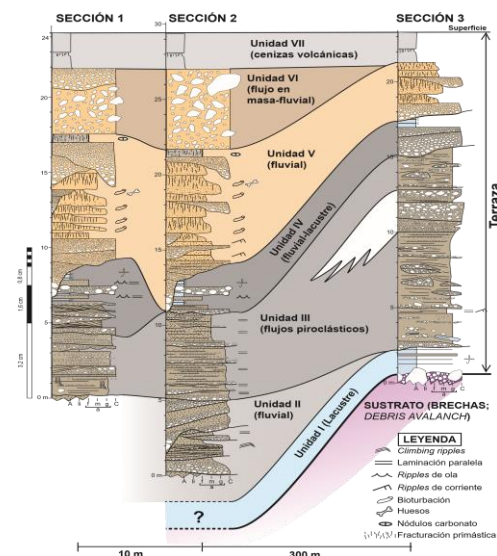


Figura 2: Panel de correlación elaborado a partir de las secciones realizadas
Elaboración: Autores.

La unidad VI se caracteriza por la presencia de un potente estrato tabular formado por brechas matriz soportadas con clastos hasta de 1 m de tamaño. Por encima de la brecha descansan estratos discontinuos de conglomerados y arenas de origen fluvial. La sucesión estratigráfica de la terraza finaliza con la unidad VII integrada por dos estratos superpuestos de ceniza fina. En el techo del inferior se puede observar fracturación prismática que indicaría cierta actividad edáfica. A lo largo de la sucesión existe un importante cambio litológico en los conglomerados fluviales. Los clastos de la unidad II presentan la misma composición que la unidad suprayacente integrada por los depósitos piroclásticos; sin embargo, en la unidad V los conglomerados presentan una litología totalmente diferente con clastos de mayor densidad de color gris oscuro con fenocristales de plagioclasa posiblemente de composición andesítica. Por otro lado, la unidad IV presenta clastos mezclados de ambas litologías.

4.2. Arquitectura estratigráfica del depósito

Los depósitos piroclásticos se encuentran dentro de la unidad III (Fig. 2), con base en el tipo de facies que le constituyen son interpretados como sedimentos acumulados a partir de flujos piroclásticos (Druitt, 1998; Sulpizio, Dellino, Doronzo, y Sarocchi, 2014). En esta unidad se han reconocido dos unidades de flujo en el sentido de Branney y Kokelaar (2002), la cuales están separadas por un estrato de cenizas tamaño limo-arcilla de color blanco interpretada como depósitos de caída aérea (*ash-cloud*) que nos

marcaría una interrupción en la sedimentación entre dos flujos piroclásticos sucesivos. Este estrato aparece discontinuo y plegado debido a la cizalla y erosión producida por el paso del flujo superior. Para analizar la arquitectura estratigráfica de estas unidades de flujo se ha utilizado el concepto de divisiones de Branney y Kokelaar (2002) que constituirían diferentes ambientes de depósito dentro del flujo piroclástico integradas por una o varias facies. Estas divisiones pueden aparecer superpuestas o bien cambiar lateralmente entre ellas. Los clastos que componen este depósito presentan vesiculación nula a media.

La unidad de flujo 1 tiene un espesor aproximado entre 2 a 3 m. Esta descansa directamente sobre la unidad II de arcillas lacustres con un contacto ligeramente erosivo. Su sucesión estratigráfica comienza en la base por un estrato de hasta 70 cm de potencia lenticular, de aglomerados clasto-soportados, con los cantos redondeados a subredondeados con gradación inversa en la base. Por encima aparece un tramo formado por ceniza gruesa y lapilli masivos con cantos dispersos decimétricos e intercalaciones de estratos lenticulares de aglomerados de hasta 2 m de longitud y 60 cm de espesor. En conjunto en este tramo los clastos aparecen concentrados hacia la parte inferior y superior del mismo.

También se observan fragmentos embebidos en las cenizas o dentro de los aglomerados de las arcillas lacustres de la unidad I. Esta unidad de flujo finaliza con un estrato continuo <50 cm de espesor formado por ceniza media con laminación fina

paralela. Esta unidad de flujo es interpretada como resultado de una corriente piroclástica con una elevada concentración de partículas. La corriente estaría estratificada con una parte inferior más densa dominada por el escape de fluidos y la interacción de partículas y una parte superior con flujo turbulento. Los conglomerados de la base y los clastos de arcilla pertenecientes a la unidad I son interpretados como indicadores de la existencia de un flujo turbulento formado por delante de la corriente principal como resultado de la entrada de aire (Branney y Kokelaar, 2002; Druitt, 1998).

La unidad V está constituida por una sucesión fluvial caracterizada por canales conglomeráticos embebidos en materiales de grano más fino. Las facies que constituyen el relleno de los canales son masivas en la base, seguida por conglomerados con superficies de acreción lateral que en ocasiones presentan superficies erosivas con cambios en la dirección de acreción de las superficies y finalizan con arenas gruesas y arenas conglomeráticas en estratos canaliformes con estratificación cruzada en surco. Los canales, en sección, presentan formas simétricas y tienen una relación baja anchura/profundidad $<6,25$. Estos no muestran una migración lateral y aparecen con una conectividad baja. En los conglomerados se han tomado medidas de paleocorrientes en las superficies de acreción lateral y los cantos imbricados. Las direcciones de las dos medias son oblicuas entre sí e indicarían una dirección de la corriente entre NO a NE.

Estos canales están embebidos en una sucesión formada por arenas

limosas y arcillosas masivas y mal clasificadas organizadas en estratos tabulares continuos lateralmente con espesores entre 50 cm a 1 m y con bases erosivas. Presentan abundante bioturbación animal en forma de galerías verticales y fracturación prismática con moteados ocreas y beis. Dentro de estos sedimentos se ha encontrado un esqueleto completo perteneciente a un ciervo.

Las características de los sedimentos que rodean a los canales permiten interpretarles como depósitos pertenecientes a lóbulos de desbordamientos. Debido a la mala clasificación de estos sedimentos, estos serían transportados y sedimentados en la llanura de inundación en forma de flujos de barro o flujos hiperconcentrados.

La elevada bioturbación, la estructura prismática y los moteados beis y ocres que presenta el sedimento sugieren que estos fueron sometidos posteriormente a su depósito a un proceso de edafización (Miall, 2006). Los canales presentan una baja relación anchura/profundidad esto muestra que no sufrían una fuerte migración lateral, eran canales estables, caracterizados por un relleno lateral resultado de la acreción de barras ancladas a los márgenes.

Estos rasgos junto con su baja conectividad son similares a las características que presentan los sistemas fluviales anastomosados estables (Makaske, Smith, y Berendsen, 2002; Nanson y Knighton, 1996).

4.3. Litofacies e hidrofacies

Se identificaron un total de 15 litofacies de tipo fluvial, mismas que fueron agrupadas en cinco asociaciones de facies.

Cuadro 1: Descripción e interpretación de las facies de tipo fluvial.

Código de facies	Facies	Litología
AF-la	Asociación de facies lacustres	Arcillas blancas intercalaciones arenosas y conglomerados
AF-cc	Asociación de canales conglomeráticos	Conglomerados con barras de acreción lateral
AF-cat	Asociación de canales conglomeráticos y arenosos tabulares	conglomerados y arenas con estratificación cruzada en surco
AF-p	Asociación de paleosuelos	Arenas limosas y arcillosas
AF-afl	Asociación de areniscas de grano fino y limolitas	Arenas de grano fino y limolitas

Dentro de los depósitos de tipo piroclástico se identificaron nueve facies que se agruparon dentro de cinco divisiones.

4.4. Caracterización hidrogeológica

Apoiados en las litofacies identificadas en campo, se correlacionan los siguientes parámetros hidráulicos de acuerdo a lo expuestos en la tabla de Klingbeil *et al.*, (1999). Se constituyeron 4 hidrofacies a partir de 14 litofacies (Cuadro 2). Las hidrofacies pueden agrupar diferentes tipos de litofacies, mientras que un tipo de litofacie solo puede pertenecer a una hidrofacie (Klingbeil *et al.*, 1999). La comparación y agrupamiento de las litofacies determinaron que para fines hidrogeológicos la gran

variedad de litofacies reconocidas en el análisis sedimentológico representa 4 facies diferentes de significancia hidrogeológica.

Cuadro 2: Correlación de las litofacies con las hidrofacies.

Litofacies	Hidrofacies	Descripción
Fsn	BM	Grava bimodal
Gh	M	Grava masiva
Gt	M	Grava masiva
Gm	M	Grava masiva
Gmm	M	Grava masiva
Gmh	M	Grava masiva
Sg	S	Arena
Srs	S	Arena
Sh	S	Arena
St	S	Arena
Sr	S	Arena
Sp	S	Arena
Fim	OW	Poco permeable

Las hidrofacies identificadas son: grava bimodal (BM); grava masiva (M); arena (S), poco permeable (OW); caracterizadas por procedimientos hidrogeológicos uniformes.

Se establece el análisis de los movimientos de aguas subterráneas de acuerdo a las formaciones seleccionadas por su interés hidrogeológico, considerando su porosidad, permeabilidad y capacidad de almacenamiento (Fig. 3).

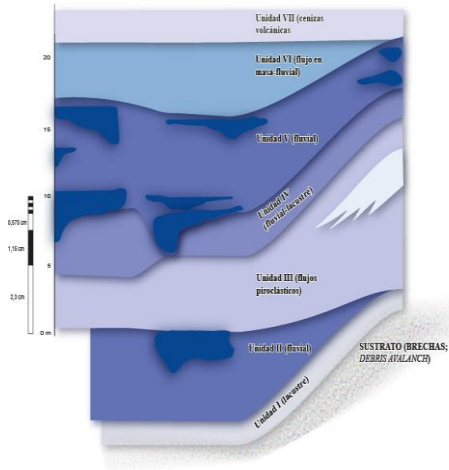


Figura 3: Caracterización hidrogeológica.
Elaboración: Autores.

5. CONCLUSIONES

- La terraza fluvial del río Tahuando se encuentra constituida por materiales siliciclásticos de origen fluvial, lacustre y volcánico.
- Dentro de los depósitos fluviales se identificaron un total de 15 litofacies compuestas en su mayoría por limo y arcilla, las cuales se agruparon dentro de cinco asociaciones de facies.
- Los depósitos de origen piroclástico están formados por nueve facies principalmente lapilli y ceniza, consecuencia del aire y la fuerza de gravedad que van depositando granos de menor tamaño a medida que aumenta la distancia entre el complejo volcánico y el lugar de deposición.
- Se identificaron mayormente depósitos de tipo piroclásticos que denotan una actividad constante del volcán Imbabura durante el Holoceno, el factor que más incidió en los procesos de erosión para la formación de las terrazas fluviales del río Tahuando fue la frecuencia de cambios climáticos ocurridos.
- Las siete unidades sedimentarias de la sucesión estratigráfica de la terraza fluvial representan un flujo segmentado por la composición de

las mismas, dando lugar a estratos con bajo porcentaje de permeabilidad.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Anderson, M., y Woessner, W. (1992). *Applied Groundwater Modelling*. Academic Press.
- Aspden, J y Litherland, M. (1992). The Geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 205, 187-204.
- Asprion, U. (1998). Ground-Penetrating Radar (GPR) Analysis in Aquifer Sedimentology: Case Studies with an Emphasis on Glacial Systems of SW-Germany. Dissertation, Sedimentology Unit, Geological Institute, University of Tu"bingen.
- Basumallick, S., 1966. Size differentiation in a cross-stratified unit. *Sedimentology* 6, 35–68.
- Beres, M., Green, A., Huggenberger, P., Horstmeyer, H. (1999). Using two and three-dimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture. *Sedimentary Geology*, 129, 1-24.
- Bluck, B.J., 1979. Structure of coarse grained braided stream alluvium. *Trans. R. Soc. Edinburgh* 70, 181–221.
- Brice, J. (1964). Channel Patterns and Terraces of the Loup Rivers in Nebraska. *United*

- States Geological Survey
Professional Paper.
- Chicago Moraine of
northeastern Illinois. J.
Sediment. Petrol. 52 (2), 473–
491.
- Branney, M., y Kokelaar, P. (2002).
*Pyroclastic Density Currents
and the Sedimentation of
Ignimbrites*. Geological
Society. London, memoirs, vol
27, 143 pp.
- Hall, J; Samaniego, M; Le Penne y
Jhonson, J. (2008). Recent
and active volcanism in the
Ecuadorian Andes, *Journal of
Volcanology and Geothermal
Research*, 176, 1-6.
- Collinson, J y Thompson, D. (1989),
Sedimentary structures, 2nd
ed.: Chapman and Hall,
London, 207 p.
- Harden, C. (2004). Terrace River.
*Encyclopedia of
Geomorphology*. Routhledge.
London.
- Cousot, P y Meunier, M. (1996),
Recognition, classification
and mechanical description of
debris flows. *Earth-Science
Reviews*, 40, 209-227.
- Hess, K. (1990). Spatial structure in
a glacial outwash, sand and
gravel aquifer, Cape Cod,
Massachusetts, 17, 509.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983).
Hidrología subterránea.
Barcelona: Omega.
- Hess, K., Wolf, S., Celia, M. (1991).
Estimation of Hydraulic
Conductivity in a Sand and
Gravel Aquifer. *USGS Water
resources investigation report*,
15–22.
- Ego F., Sebrier M., Lavenu A., Yepes
H., Egüez A. (1993).
Quaternary state of stress in
the northern Andes and the
restraining bend model for the
Ecuadorian Andes. *Second
ISAG, Oxford (UK), extended
abstract*, 89-92.
- Huggenberger, P y Aigner, T. (1999).
Introduction to the special
issue on aquifer-
sedimentology: problems,
perspectives and modern
approaches, *Sedimentary
Geology*, 129, 179-186.
- Ficcarelli, G., Azzaroli, A., Borselli,
V., Coltorti, M., Dramis, F y
Fejfar, O. et al. (1992).
Stratigraphy and paleontology
of upper Pleistocene deposits
in the interandean depression,
northern Ecuador. *Journal Of
South American Earth
Sciences*, 6(3), 145-150.
Disponibile en:
[http://dx.doi.org/10.1016/0895-9811\(92\)90004-i](http://dx.doi.org/10.1016/0895-9811(92)90004-i)
- Huggenberger, P y Regli, C. (2009).
*A sedimentological model to
characterize braided river
deposits for hydrogeological
applications*. Department of
Geosciences, Applied and
Environmental Geology,
University of Basel, Basel,
Switzerland.
- Fraser, G y Cobb, J. (1982). Late
Wisconsin proglacial
sedimentation along the West
Jussel, P. (1992). Modellierung des
Transports gelo"ster Stoffe in
inhomogenen

- Grundwasserleitern. Inst. für Hydromechanik and Wasserwirtschaft, ETH Zurich, R-29-92, 323 pp. 13 p.
- Jussel, P., Stauffer, F., Dracos, Th. (1994). Transport modeling in heterogeneous aquifers, 1. Statistical description and numerical generation of gravel deposits. *Water Resour. Res* 30 (6), 1803–1817.
- Kellog, J y Bonini, E. (1982). Subduction of Caribbean Plate and basement uplifts in the overriding South America Plate. *Tectonics*, 1 (3), 251-276.
- Kemper, K. (2004). Preface: Groundwater from development to management. *Hidrogeology Journal*, 12, 3-5.
- Klingbeil, R. (1998). Outcrop Analogue Studies — Implications for Groundwater Flow and Contaminant Transport in Heterogeneous Glaciofluvial Quaternary Deposits. Dissertation, Department of Applied Geology, University of Tu"bingen.
- Klingbeil, R., Teutsch, G., Kleineidam, S., Whittaker, J y Aigner, T. (1998). Characterisation and modelling of Quaternary outcrop analogues. Abstracts of EGS Meeting 1998, *Annales Geophysicae*, Supplement II to Volume 16.
- Klingbeil, R., Kleineidam, S., Asprion, U., Aigner, T., Teutsch, G. (1999). Relating lithofacies to hydrofacies: outcrop-based hydrogeological characterisation of Quaternary gravel deposits. *Sedimentary Geology*, 129, 239-310.
- Llamas, M y Martinez, P. (2005). Intensive Groundwater use: A Silent Revolution that cannot be Ignored. *Ciencia y tecnología del agua*, 51 (8), 167-174.
- Leopold, L., Wolman, M., y Miller, J. (1964). *Fluvial proceses in Geomorphology*. Freeman. San Francisco.
- MacEachern, J., Bann, J., Bhattacharya, P y Howell, C. (2005). *Ichnology of deltas: Organism responses to the dynamic interplay of rivers, waves, storms, and tides*, in L. Giosan and J. P. Bhattacharya, eds., *River deltas: Concepts, models and examples: SEPM Special Publication 83*, p. 49–85.
- McCabe, P. (1984). *Depositional models of coal and coal-bearing strata*. In: Rahmani, R.A., Flores, R.M. (Eds.), *Sedimentology Of Coal And Coal-Bearing Sequences 7*. IAS Special Publication, 13–42.
- Miall, A. (1985). Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth Sci. Rev.* 22, 261–308.
- Miall, A. (2006). *The Geology of Fluvial Deposits*.

- Miall, A y Tyler, N. (eds) (1991). *Three-Dimensional Facies Architecture of Terrigenous Clastic Sediments and its Implications for Hydrocarbon Discovery and Recovery*. Concepts in Sedimentology and Paleontology, 3, 1-300.
- Moltyaner, G., Killey, R. (1988). The Twin Lake tracer tests: longitudinal dispersion. *Water Resour*, 24 (10), 1613–1627.
- Mulder, T y Alexander, J. (2001). *Sedimentology: The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits*, 48, 2, 269-299. doi: 10.1046/j.1365-3091.2001.00360.x
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*. Gran Bretaña. Wiley-Blackwell.
- Park, C. (1981). Man, river system and environments impacts. *Progress in Physical Geography*, 5, 1-31.
- Pazzaglia, F., y Gardner, T. (1993). *Fluvial terraces of the lower Susquehanna River*. *Geomorphology*, 8, 83-113.
- Pazzaglia, F. J. (2013). Fluvial terraces. In J. Shroder (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. (Vol. 9. Fluvial Geomorphology, pp. 379-412). San Diego: Academic Press.
- Pedraza, J. (1996). *Geomorfología: principios y aplicaciones*. Madrid, España: Editorial Rueda.
- Pennec, L., Ruiz, A., Eissen, J., Hall, M y Fornari, M. (2011). Identifying potentially active volcanoes in the Andes: Radiometric evidence for late Pleistocene-early Holocene eruptions at Volcán Imbabura, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206, 121-135.
- Pennington, W. (1981). Subduction of the Eastern Panama Basin and Seismotectonic of Northwestern South America. *Journal Geophysic*, 86 (11), 10753-10770.
- Piégay, H., y Shumm, S.A. (2003). Systems approaches in fluvial geomorphology. En: Kindolf, G., y Piégay, H. (Eds): *Tolls in Fluvial Geomorphology*. Willey. Chichester, 105-134.
- Park, C. (1981). Man, river system and environments impacts. *Progress in Physical Geography*, 5, 1-31.
- Pryor, W. (1973). Permeability–porosity patterns and variations in some Holocene sand bodies. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 57 (1), 162–189.
- Ptak, T., Teutsch, G. (1994). Forced and natural gradient tracer tests in a highly heterogeneous porous aquifer: instrumentation and measurements. *J. Hydrol.* 159, 79–104.
- Reading, H. (1996). *Sedimentary environments: process, facies and stratigraphy*. Oxford: Blackwell Science.

- Schumm, S.A. (1963). Sinuosity of alluvial rivers of the Great Plains. *Bulletin of the Geological Society of America*, 74, 1089-1100.
- Tarback E., Lutgens, F. y Tasa, D. *Ciencias de la Tierra*. Edit. Prentice Hall, edición 2005, trad. de 8ª ed. España, Madrid.
- Tucker (2001). *Sedimentary Petrology* (3rd ed.), by M.E. Blackwell Science, Osney Mead, Oxford OX2 0EL, UK; 1-262.
- Villagómez, D. (2003). *Evaluación Geológica Plio-Cuaternaria del Valle Interandino central en Ecuador (Zona de Quito Guayllabamba- San Antonio)*. (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Webb, E. K., & Anderson, P. M. (1996). Simulation of preferential flow in three-dimensional heterogeneous conductivity fields with realistic internal architecture. *Water Resources Research*, 32(3), 533-545.
- Winkler, W., Spikings R., Villagómez D., Egüez A., Abegglen P., Tobler S. (2002). Fourth ISAG, Toulouse-France. *The Chota Basin and its significance for the formation of the Inter-Andean Valley in Ecuador Fourth ISAG*, Toulouse-France. pp. 705-708
- Weissmann, S., Pickel, A., McNamaraL, K., Frechette1, J., Kalinovich, I., Allen-King, R., Jankovic, I. (2015). *Characterization and quantification of aquifer heterogeneity using outcrop analogs at the Canadian Forces Base Borden, Ontario, Canada*. Geological Society of America Bulletin. doi:10.1130/B31193.1.
- Zappa, G., Bersezio, R., Felletti, F y Giudici, M. (2006). Modeling heterogeneity of gravel-sand, braided stream, alluvial aquifers at the facies scale. *Journal of Hydrology*, 325(1-4), 134-153. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.016>