

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.

PLAN DE TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN
RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTORES:

MERO GARCÍA GÉNESIS MARÍA
VILLEGAS PÉREZ LENNIN ISRAEL

DIRECTOR:

PhD. James Rodríguez

OCTUBRE 2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

ESCUELA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

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

Tesis de Grado revisada por el Comité Asesor, por lo cual se autoriza su
presentación como requisito parcial para obtener el Título de:

INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

APROBADA:

PhD. James Rodriguez
DIRECTOR


FIRMA

Gladys Yaguana MSc.
ASESORA


FIRMA

Oscar Rosales MSc.
ASESOR


FIRMA

Paúl Arias MSc.
ASESOR


FIRMA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD
TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejamos sentada nuestra voluntad de participar en este proyecto, para lo cual ponemos a disposición la siguiente información.

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE CIUDADANIA:	092893626-9	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Mero García Génesis María	
DIRECCIÓN:	Ibarra, Parroquia El Sagrario, barrio El Olivo	
E-MAIL:	gmmerog@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:		TELEFONO MÓVIL: 0958941271

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE CIUDADANIA:	100370444-0	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Villegas Pérez Lennin Israel	
DIRECCIÓN:	Ibarra, Parroquia San Antonio, barrio Bellavista	
E-MAIL:	livillegasp@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	2933391	TELEFONO MÓVIL: 0982450222

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE UNA TERRAZA FLUVIAL DEL RÍO TAHUANDO MEDIANTE EL ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO, IBARRA, IMBABURA.
AUTORES:	MERO GARCÍA GÉNESIS MARÍA VILLEGAS PÉREZ LENNIN ISRAEL
FECHA:	19 de octubre de 2017
PROGRAMA:	Pregrado
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Recursos Naturales Renovables
DIRECTOR:	PhD. James Rodríguez

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Nosotros, **MERO GARCÍA GÉNESIS MARÍA**, con Cédula de Ciudadanía Nro. 092893626-9 y **VILLEGAS PÉREZ LENNIN ISRAEL**, con Cédula de Ciudadanía Nro. 100370444-0; en calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del Trabajo de Grado descrito anteriormente, hacemos la entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizamos a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital y uso del activo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con La Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

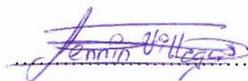
Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor, por lo tanto, la obra es original y es la titular de los derechos patrimoniales; por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en el caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 19 días del mes de octubre del 2017.

ACEPTACIÓN:



.....
Mero García Génesis María
C.C.: 092893626-9



.....
Villegas Pérez Lennin Israel
C.C.: 100370444-0



.....
Ing. Betty Chávez
Biblioteca Universitaria UTN



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Nosotros, **MERO GARCÍA GÉNESIS MARÍA**, con Cédula de Ciudadanía Nro. 092893626-9 y **VILLEGAS PÉREZ LENNIN ISRAEL**, con Cédula de Ciudadanía Nro. 100370444-0, manifestamos nuestra voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autores de la obra o trabajo de grado denominada **“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE UNA TERRAZA FLUVIAL DEL RÍO TAHUANDO MEDIANTE EL ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO, IBARRA, IMBABURA”**, que ha sido desarrollada para optar por el título de **Ingenieros en Recursos Naturales Renovables** en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Mero García Génesis María
C.C.: 092893626-9

Villegas Pérez Lennin Israel
C.C.: 100370444-0

Ibarra, a los 19 días del mes de octubre del 2017.

vi

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: FICAYA – UTN

Fecha: Ibarra, a los 19 días del mes de octubre de 2017

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

Ingeniera en Recursos Naturales Renovables. Universidad Técnica del Norte. Carrera de
Ingeniería en Recursos Naturales. Ibarra 19 octubre de 2017. 118 paginas.

DIRECTOR: PhD. James Rodríguez

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


.....
Mero García Génesis María
C.C.: 092893626-9


.....
Villegas Pérez Lennin Israel
C.C.: 100370444-0

DEDICATORIA

“La experiencia no tiene valor ético alguno, es simplemente el nombre que damos a nuestros errores”.

Oscar Wilde

La vida nos da la oportunidad de conocer y aprender y con ello emprender nuevos horizontes. Dedico este trabajo a mi hermosa familia, mis padres María y José, que han sido siempre mi refugio y mi fortaleza, a mi hermanita Denisse quien fue un apoyo fundamental para luchar en esta batalla en la cual me declaro victoriosa.

A mis tíos, Hugo y Vicky, quienes estuvieron de cerca en el trascurso de mi carrera y a quienes les debo también parte primordial de mi desarrollo personal; a mis primos Hugo, Naty, Jennifer y Cintya, quienes fueron un gran apoyo en momentos cruciales de mi vida.

A mis amigas y amigos que fueron parte y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Genesis Mero

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico primero a Dios por ser quien siempre guía mi camino, lo llena de luz, esperanza y me da la fortaleza para siempre salir adelante.

A mis padres Leonardo y Estela por ser quienes me han apoyado durante este proceso, gracias a sus enseñanzas soy una persona que busca y lucha por sus sueños, son mi ejemplo a seguir y por siempre mi inspiración de ser una mejor persona, los quiero mucho y para ustedes es este trabajo. Y por supuesto a mi hermano David, quien a su corta edad ha sido la compañía perfecta en este largo camino que recorrí para llegar a cumplir con mi meta.

Lennin Villegas

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Técnica del Norte, la escuela de Recursos Naturales R. por habernos permitido formar parte de su noble institución y lograr con ello una formación personal crítica y curiosa del medio en que vivimos.

Agradecemos también a nuestra guía fundamental, el PhD. Germán Martín, quien desde un inicio supo compartir de una manera desinteresada sus conocimientos para con nosotros.

A nuestro director PhD. James Rodríguez quien supo guiarnos de la mejor manera hacia la culminación de este trabajo; a nuestros asesores, MSc. Oscar Rosales, MSc. Gladys Yaguana y MSc. Paúl Arias, por haber apoyado de manera oportuna el desarrollo de este trabajo.

A nuestros familiares quienes han sido el apoyo en todo sentido, y creído siempre en nosotros, esto es para ustedes.

A nuestros amigos, quienes de alguna forma u otra siempre estuvieron allí, para motivarnos y formar parte de este sueño.

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 lithofacies 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.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	xi
SUMMARY	xii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	xiii
ÍNDICE DE MAPAS	xvi
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
CAPÍTULO I	18
1. Introducción	18
1.1. Objetivos	19
1.1.1. <i>Objetivo general</i>	19
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	20
1.2. Preguntas Directrices	20
CAPÍTULO II.....	21
2. Marco teórico referencial.....	21
2.1. Antecedentes	21
2.2. Hidrogeología	23
2.3. Procesos fluviales.....	23
2.4. Hidrología: acuífero	23
2.5. Sistemas fluviales: características y depósitos asociados.....	24
2.6. Terrazas fluviales: definición, características y origen.....	27
2.7. Arquitectura fluvial	27
2.8. Depósitos Piroclásticos	28
2.8.1. <i>Rocas piroclásticas</i>	28
2.9. Sedimentología	29

2.9.1.	<i>Rocas sedimentarias</i>	29
2.9.2.	<i>Tipos de Rocas sedimentarias</i>	30
2.9.3.	<i>Rocas sedimentarias detríticas</i>	30
2.10.	Estratigrafía.....	31
2.11.	Facies: Asociaciones de facies	32
2.11.1.	<i>Litofacies</i>	32
2.12.	Hidrofacies.....	32
2.13.	Geología Regional	32
2.14.	Marco legal	35
CAPÍTULO III.....		38
3.	Materiales y Métodos.....	38
3.1.	Caracterización del área de estudio.....	38
3.1.1.	<i>Clima</i>	40
3.1.2.	<i>Hidrología</i>	40
3.1.3.	<i>Geología local</i>	41
3.2.	Materiales.....	43
3.3.	Metodología	43
3.3.1.	<i>Identificación de litofacies e hidrofacies; descripción de la arquitectura fluvial y evolución vertical del depósito.</i>	43
3.3.2.	<i>Características hidrogeológicas de estos depósitos fluviales</i>	45
CAPÍTULO IV.....		46
4.	Resultados y Discusión	46
4.1.	Sedimentología y estratigrafía	46
4.2.	Facies y asociaciones de facies	49
4.2.1.	<i>Asociaciones de facies fluviales y lacustres</i>	49
4.2.2.	<i>Divisiones de facies piroclásticas</i>	61

4.2.3. <i>Arquitectura estratigráfica</i>	71
4.2.4. <i>Relación de hidrofacies con litofacies</i>	76
4.3. Características hidrogeológicas del depósito	79
CAPÍTULO V	80
5. Conclusiones y recomendaciones	80
5.1. Conclusiones	80
5.2. Recomendaciones	81
REFERENCIAS.....	82
ANEXOS	90

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1: Mapa geológico del volcán Imbabura	34
Mapa 2: Ubicación del área de estudio	39
Mapa 3: Geología del área de estudio	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades hidrogeológicas de las rocas.....	24
Tabla 2: Clasificación de las rocas detríticas según el tamaño del clasto.....	31

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Descripción e interpretación de facies fluviales (lacustres)	58
Cuadro 2: Descripción e interpretación de facies fluviales (conglomeráticos).....	59
Cuadro 3: Descripción e interpretación de las asociaciones de facies	60
Cuadro 4: Descripción e interpretación de las facies de tipo piroclástico.....	68
Cuadro 5: Descripción e interpretación de las facies de tipo piroclástico	69
Cuadro 6: Descripción e interpretación de las facies de tipo piroclástico.....	70
Cuadro 7: Correlación de las litofacies con las hidrofacies	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zonas que se reconocen en un sistema fluvial idealizado.....	25
Figura 2: Clasificación de canales fluviales.	26
Figura 3: Clasificación de las rocas piroclásticas según su tamaño.	28
Figura 4: Panel de correlación	47
Figura 5: Facies carbonáticas, Fósil vegetal (Fv)	50
Figura 6: Esquema del canal.	52
Figura 7: Facies con superficie erosiva (Se), Ripples (Ri).	54
Figura 8: Estratificación difusa y gradación normal	55
Figura 9: A. Bioturbación presente en las facies conglomeráticas.....	55
Figura 10: A. Bioturbación presente en el escarpe (Bi); B. Raíz actual (Ra).	57
Figura 11: A. Fósil animal (Fa); B. Representación de angular blocky (Ab).....	57
Figura 12: Esquema de facies de flujo piroclástico.....	63
Figura 13: Facies pAg(g). Estratos tabulares y estratos lenticulares.....	64
Figura 14: Depósitos de aglomerados clatosoportados	64
Figura 15: Facies xsT: superficie erosiva inferior	67
Figura 16: Facies mt: gradación normal con base de superficie erosiva.	67
Figura 17: Arquitectura estratigráfica de los depósitos piroclásticos de la Unidad III.....	72
Figura 18: Arquitectura estratigráfica de los depósitos fluviales de la Unidad V.....	75
Figura 19: Representación paleo ambiental del sistema fluvial en estudio.....	76
Figura 20: Correlación de hidrofacies	78
Figura 21: Características hidrogeológicas.....	79

CAPÍTULO I

1. 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, Aspiron, Aigner, & Teutsch, 1999; Zappa, Bersezio, Felletti, & Giudici, 2006).

La investigación se alinea a dos de los objetivos estratégicos del Plan Nacional del Buen Vivir, objetivo 3 “Mejorar la calidad de vida de la población”; y el objetivo 7 “Garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental y global”; puesto que los beneficiados serán los habitantes que realizan algún tipo de actividad en la ciudad de Ibarra, ya que constituye un punto de partida para la toma de decisiones, conservación y potencial aprovechamiento del agua subterránea.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- 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.

1.1.2. *Objetivos específicos*

- Identificar las litofacies e hidrofacies.
- Describir la arquitectura estratigráfica del depósito y su evolución vertical.
- Interpretar las características hidrogeológicas de estos depósitos fluviales.

1.2. Preguntas Directrices

- ¿Qué características y propiedades hidrogeológicas presentan estos depósitos fluviales?
- ¿Cómo son las características estratigráficas y sedimentológicas de los depósitos fluviales que constituyen la terraza en estudio?

CAPÍTULO II

2. Marco teórico referencial

En el siguiente capítulo se detalla los antecedentes y la información general recopilada, misma que sustenta la interpretación y el análisis de los resultados obtenidos en la realización de la investigación.

2.1. Antecedentes

Numerosos trabajos se han llevado a cabo en las últimas décadas sobre afloramientos de sedimentos fluviales cuaternarios destinados a estudiar sus características estratigráficas y sedimentológicas, con el fin de utilizarles como análogos para comprender los depósitos que constituyen los yacimientos de agua subterránea. Existen problemas en la interpretación de las rocas acuíferas en relación a aquellas características responsables de los patrones de flujo y los procesos de transporte. Para resolver estos problemas es necesario mejorar el conocimiento sobre las heterogeneidades dentro de estos depósitos que condicionan sus propiedades hidráulicas (Klingbeil *et al.*, 1999). Estudios como los de (Sudický, 1986; Hess, 1990; Hess *et al.*, 1991; Moltyaner y Killey, 1988; y Ptak y Teutsch, 1994) dedujeron que las técnicas de investigación estándares como: pruebas de bombeo, mediciones de caudal o análisis de núcleos no son suficientes para la adquisición de datos necesarios para comprender los patrones de flujo en el acuífero.

Klingbeill *et al.*, (1999) realizaron un estudio de caracterización hidrogeológica en el Norte del lago Constance, en el estado federal de Baden-Wultemberg (sureste de Alemania), en el cuál estableció la relación entre litofacies e hidrofacies basados en depósitos de grava procedentes del Cuaternario. Para ello utilizó el método de identificación propuesto por Miall (1985), análisis de los elementos arquitecturales, en dicho estudio se identificaron 23 litofacies que equiparadas dieron un total de 5 hidrofacies.

Por su parte Huggenberger y Regli (2009), realizaron un estudio en la unión de los ríos Rin y Wiese ubicados Suiza, para este trabajo utilizaron como método el Georadar (GPR), realizando

en el área de estudio cinco perforaciones con una extensión total de 3040 m. Con los datos obtenidos luego de caracterizar los tipos de estructuras sedimentarias, se les correlacionó y se asignó un valor a las propiedades hidráulicas por lo que se pudo representar la dirección del flujo principal. Además, en el análisis se encontró extensas clases de correlación espacial a partir de unos escasos metros hasta decenas de metros para las diferentes tipologías de estructuras sedimentarias.

Sobre la Base de las Fuerzas Canadienses Borden en Canadá, Weissmann *et al.*, (2015) realizaron una caracterización y cuantificación de la heterogeneidad del acuífero utilizando análogos de afloramiento, dada la importancia de la determinación de la estructura interna de los acuíferos se estableció este lugar. En un afloramiento presente en una cantera de arena cortada en el sedimento del acuífero Bord, se tomaron varias fotografías de alta resolución teniendo en cuenta la detección de luz basadas en tierra y LiDAR, esto permitió valorar y cuantificar la distribución de las litofacies e hidrofacies que registran las propiedades de flujo en el acuífero.

En Ecuador son escasos los estudios realizados sobre los depósitos cuaternarios asociados al modelado del relieve. Este tipo de depósitos tienen una gran representación en la cordillera de los Andes y especialmente en la depresión interandina donde se sitúa este estudio. Solamente Ficarelli *et al.*, (1992) realizaron un estudio estratigráfico y paleontológico de los depósitos del Pleistoceno superior. El trabajo fue enfocado en los aspectos paleontológicos y geomorfológicos del área de Bolívar. En este trabajo se concluye que la depresión interandina se desarrolló desde finales del Mioceno, a través de dos fases en la cual la primera se caracterizó por la deposición fluvial y fluvio-lacustre, posteriormente la actividad tectónica y volcánica dio lugar a la deposición de material piroclástico.

El crecimiento y desarrollo de la ciudad de Ibarra en las últimas décadas ha originado una demanda de agua potable que ha rebasado la disponibilidad actual del recurso dentro del área, realidad que ha motivado a la Empresa de Agua Potable la prospección de las aguas subterráneas, para lo cual es indispensable contar con un estudio hidrogeológico que ayude al conocimiento de las condiciones del subsuelo y por ende al aprovechamiento sostenible del recurso (Bolívar Núñez, 2005).

2.2. Hidrogeología

Custodio y Llamas (1983) en el libro “Hidrología Subterránea”, Ediciones Omega S.A., Barcelona 1983, pg. 249, citan el siguiente concepto: “La hidrogeología es la rama de la hidrología que trata del agua subterránea, su yacimiento y movimientos, su enriquecimiento y empobrecimiento; de las propiedades de las rocas que controlan sus movimientos y almacenamiento, así como de los métodos de su investigación, utilización y conservación”.

2.3. Procesos fluviales

El término fluvial es perteneciente y hace referencia a los ríos, por tanto, la característica principal de estos procesos son el río. No obstante, esto puede traer varias equivocaciones consigo, puesto que no existe un concepto individual para calificar dicho agente dinámico, ciertos autores definen esa cualidad a corrientes de agua con sistema permanente y uniforme, estable en sus cauces y con sus redes siguiendo una jerarquización; mientras tanto otros amplían este concepto para todo tipo de sistema de drenaje, dejando de lado las demás características (Gutiérrez, 2008).

Los procesos fluviales se forman gracias a los flujos de agua encauzados o semiencauzados, efímeros, intermitentes, perennes o estacionales, con colector múltiple o sencillo, energía baja, media o alta y con dinámica propia (Gutiérrez, 2008).

2.4. Hidrología: acuífero

Según Rojas y Paredes (2013). Las circulaciones de agua subterránea se producen cuando existen vacíos en el suelo o la roca conectada entre sí, en caso de no existir estos espacios, no se produciría el movimiento de agua. Se detallan dos tipos de vacíos:

-Vacíos de espacio poroso: Los poros simbolizan el único tipo de vacío que poseen las rocas no consolidadas (suelos, sedimentos sueltos como arena, grava), algunas rocas volcánicas también pueden tener espacios porosos notables (Rojas y Paredes, 2013).

-Vacíos de espacio de grieta: Las grietas, fracturas y diaclasas constituyen los vacíos en rocas consolidadas, como rocas metamórficas (pizarras o esquistos) e ígneas (andesitas o granitos).

No obstante, varias rocas sedimentarias (conglomeradas y areniscas), cuentan con una porosidad elevada (Tabla 1) (Rojas y Paredes, 2013).

Tabla 1: Propiedades hidrogeológicas de las rocas

Partículas y tipo de roca	Tipos de cavidades	Porosidad	Permeabilidad	Caudales máximos (l/m)
Grava	Poros	Elevada	Elevada	3800
Arena	Poros	Elevada	Elevada	1000
Arcilla	Poros	Elevada	Muy baja	<4
Arenisca poco cementada	Poros y fisuras	Variable	Elevada	Hasta 800
Caliza	Poros, fisuras y cavernas	Muy variable	Variable, generalmente elevada	1700-1000000
Roca piroclástica poco cementada	Poros	Elevada	Variable, generalmente elevada	Hasta 2400
Riolita	Poros y fisuras	Variable	Generalmente baja variable	Baja entre 4 100 frecuente
Granito no alterado	Fisuras	Muy baja (casi nula)	Muy baja	4-40 frecuente
Gneis	Fisuras	Muy baja (casi nula)	Muy baja	<40
Basalto	Poros, fisuras y cavernas	Variable	Variable	1700-3800 frecuente

Fuente: Rojas y Paredes (2013).

2.5. Sistemas fluviales: características y depósitos asociados.

El sistema se puede definir como una combinación significativa de elementos que forman un conjunto complejo, con conexiones, interrelaciones y transferencias de energía y materia entre ellos. En el caso de sistema fluvial no solo implica a los canales fluviales principales, sino también al conjunto de las redes de drenaje, zonas de sedimentación de abanicos aluviales, deltas, así como también la escorrentía y sedimentos de ladera (Piégay y Shumm, 2003). El sistema fluvial cambia con el tiempo debido a la actividad de los procesos erosivos y de sedimentación; también responde a los cambios climáticos, modificaciones del nivel base, tectónica cuaternaria y actividades humanas (Park, 1981). Por consiguiente, las labores de predicción en un sistema fluvial son difíciles de llevar a cabo debido a su variabilidad (Gutiérrez, 2008).

La (Fig. 1) representa un esquema idealizado de un sistema fluvial (Shcumm, 1977) en el que se distinguen tres zonas. El área superior de la cuenca (Zona 1) constituye el área de producción de la esorrentía y sedimentos. La zona 2 es el sector de transferencia y en la zona 3 se produce la sedimentación (abanicos aluviales, deltas, llanuras de inundación).

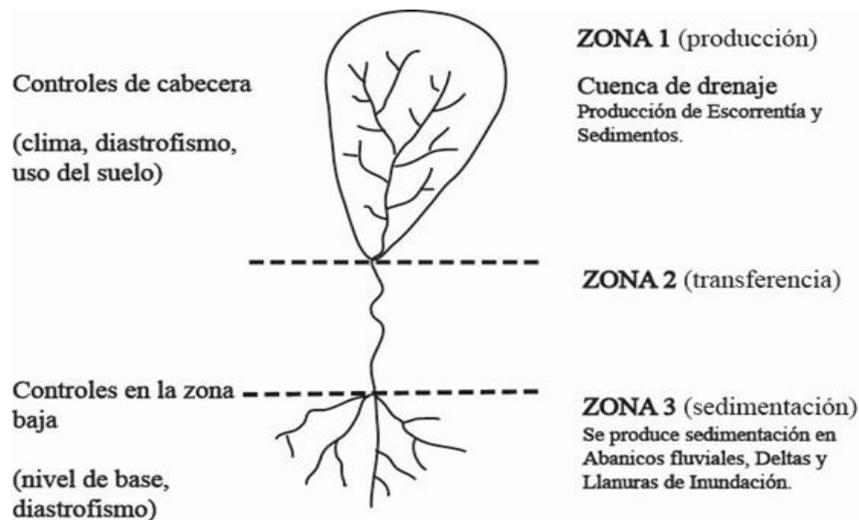


Figura 1: Zonas que se reconocen en un sistema fluvial idealizado.

Fuente: Shcumm (1977).

A partir de la observación de sistemas de canales se pueden diferenciar tres tipos básicos de cursos fluviales (Fig. 2): rectos, meandriformes y trenzados. Sin embargo, existe un rango completo entre ellos desarrollándose diferentes sistemas fluviales con rasgos mezclados de alguno de los tipos básicos. Los canales rectos y meandriformes se diferencian por su sinuosidad (Schumm, 1963), que es la relación entre longitud del canal y la longitud del valle, o la relación de la pendiente del valle con el gradiente del canal.

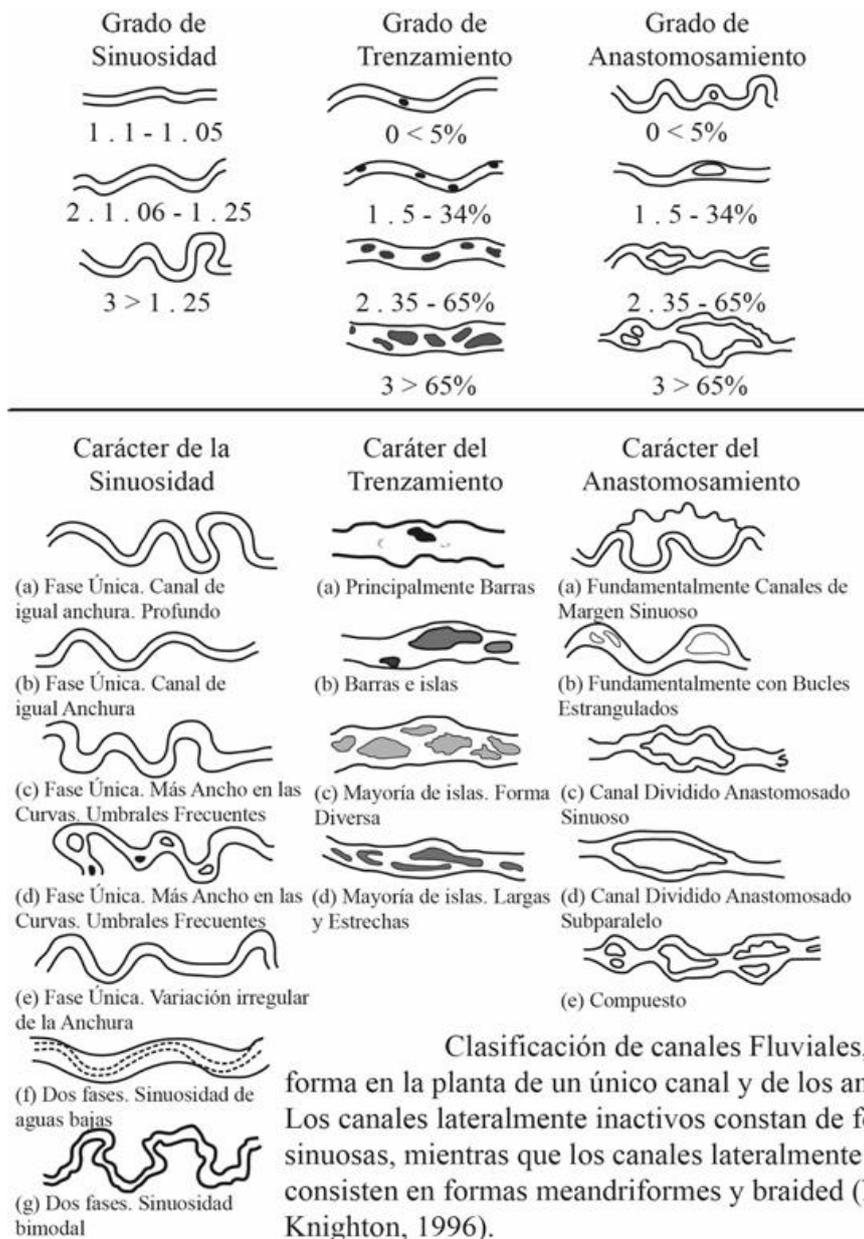


Figura 2: Clasificación de canales fluviales.
Fuente: (Nanson y Knighton, 1996), citado en Gutiérrez (2008).

El canal trenzado está construido por barras e islas y el grado de entrenzamiento se expresa por el porcentaje de la longitud dividido por la longitud de una o más barras. Es un índice variable, ya que la longitud de las barras depende de la época de medida. El grado de anastomosamiento es el porcentaje de la longitud medida que está ocupada por grandes islas (Brice, 1964).

2.6. Terrazas fluviales: definición, características y origen.

Las terrazas fluviales son depósitos aluviales resultado del modelado del relieve producido durante el proceso de incisión fluvial. Su formación está controlada principalmente por factores tectónicos y climáticos a nivel de cuenca (Pazzaglia y Gardner 1993). Morfológicamente las terrazas constituyen plataformas sedimentarias formadas en un valle fluvial por los sedimentos del río depositados a los lados del cauce, constituidas morfológicamente por un relleno y un escarpe. Generalmente las terrazas fluviales buzanan levemente hacia aguas abajo, a menos que se vea afectada por movimientos tectónicos (Harden, 2004).

El origen de las terrazas se da principalmente por el cambio en el clima, que produce un aumento o disminución de carga en la corriente de agua. Estos cambios climáticos forman las terrazas fluviales a través de dos etapas, en la primera se produce un ensanchamiento del valle fluvial mediante una erosión lateral del cauce y sedimentación formando una llanura de inundación. En la segunda el río concentra su acción erosiva en la vertical produciendo una sobre excavación que dará lugar a un nuevo valle fluvial dejando por encima la antigua llanura de inundación. La repetición en el tiempo de estos procesos dará como resultado una sucesión de terrazas mostrando una morfología escalonada en los flancos de los valles. Las terrazas fluviales constituyen antiguas llanuras de inundación abandonadas (Leopold *et al.*, 1964; Pedraza, 1996).

Las terrazas fluviales han sido estratégicamente utilizadas por la población, ya que asociadas a ellas se desarrollan extensas superficies planas en los fondos de los valles idóneas para el asentamiento de ciudades o el desarrollo de actividades agrícolas (Pazzaglia y Gardner 1993). Las terrazas fluviales proporcionan una oportunidad a los científicos para estudiar la actividad tectónica, procesos fluviales y paleoclimatología del Cuaternario. Cuando su estudio se combina con la geo-cronología que arroja edades numéricas, estas pueden ser utilizadas como marcadores geodésicos para comprender la evolución del relieve (Pazzaglia y Gardner 1993).

2.7. Arquitectura fluvial

Término que hace referencia a la geometría y ordenamiento interno de los cursos fluviales y de las llanuras de inundación en una secuencia fluvial (Miall, 2006). Se entiende como un

elemento arquitectónico fluvial el componente de un sistema sedimentario equivalente en tamaño no mayor que un canal, y no menor que una unidad de facies. Además, este se caracteriza por poseer un conjunto distintivo de facies, geometría interna y forma externa (Miall, 2006).

2.8. Depósitos Piroclásticos

El fenómeno de la “fragmentación” del magma que se produce durante una erupción volcánica admite la transformación de partículas de magma de tamaño variable (piroclastos) translocado en un medio gaseoso. Los contrastes en el mecanismo principal de transporte toleran diversificaciones en el tipo de estructuras en los materiales volcánicos resultantes. De este modo, los depósitos resultantes por la emisión de material piroclástico se pueden catalogar a grandes rasgos como depósitos de coladas piroclásticas, depósitos piroclásticos de caída y depósitos de oleadas piroclásticas (Branney y Kokelaar, 2002).

2.8.1. Rocas piroclásticas

Son las formadas por procesos de compactación o cementación de fragmentos. Existen las constituidas principalmente de bombas, que forman los aglomerados, y las constituidas principalmente de bloques, que son llamadas brechas volcánicas (Fig. 3). Las cenizas litificadas dan lugar a las tobas ricas en lapilli.

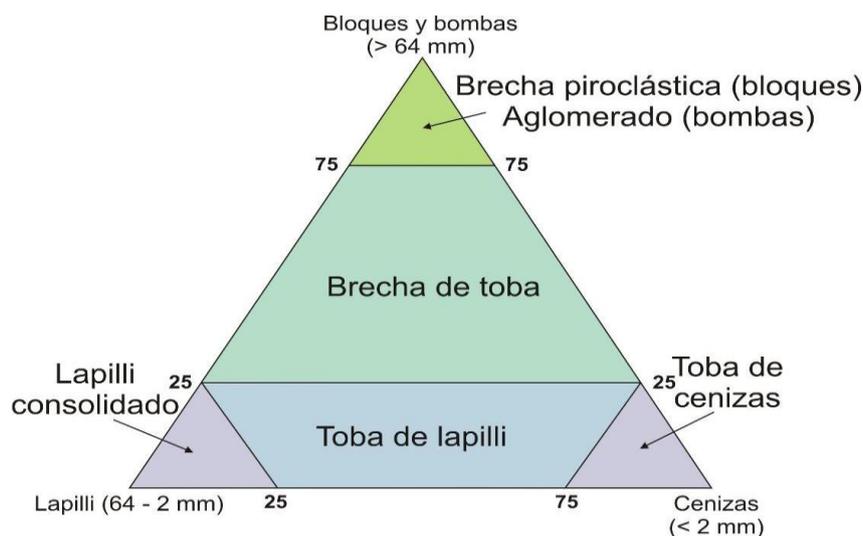


Figura 3: Clasificación de las rocas piroclásticas según su tamaño (milímetros).
Fuente: Petroigneá, (2017).

2.9. Sedimentología

Es la parte de la geología que explica los procesos de transporte, formación y deposición del material que se acumula como sedimento en entornos continentales y marinos que eventualmente forman rocas sedimentarias. La sedimentología ha existido como una parte de las ciencias geológicas tan solo por algunas décadas. Esto se desarrolló en la medida que los elementos observacionales de la estratigrafía física se forjaron más cuantitativos y las capas de estratos se discurren en términos de los procesos físicos, biológicos y químicos que los formaron (Gutiérrez, 2008; Nichols, 2009).

La naturaleza de los depósitos sedimentarios es muy variada en su tamaño, forma, origen y organización, las partículas pueden provenir de la erosión de las rocas longevas o directamente del volcán, organismos de origen muy significativo del material, extendiéndose de los filamentos microbianos incrustados con el carbonato de calcio y los desechos de las plantas. Así mismo la precipitación directa de los minerales ayuda a la formación de sedimentos en algunos de los casos (Nichols, 2009; Gutiérrez, 2008). El establecimiento de un cuerpo sedimentario involucra el transporte de partículas al lugar de deposición por varios factores, tales como la gravedad, agua, aire, flujos de masa o el incremento químico o biológico del material depositado (Nichols, 2009).

2.9.1. Rocas sedimentarias

Los resultados de la meteorización mecánica y química componen la materia prima para las rocas sedimentarias. El término sedimentario hace referencia a la naturaleza de esas rocas que indica al material sólido que se deposita a partir de un fluido (agua - aire). Gran parte del sedimento se deposita de esta manera. Los restos meteorizados son transportados asiduamente desde el lecho de roca para ser depositados en los lagos, los valles de los ríos, los mares, entre otros. Puesto que la meteorización, el transporte y el depósito de los productos de meteorización son constantes es fácil encontrar sedimentos en casi cualquier parte. Acorde a la acumulación de sedimentos, los materiales cercanos al fondo se compactan. Durante largos periodos, el material mineral depositado en los espacios que queda entre las partículas maciza formando la roca sólida (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005).

“Dado que los sedimentos se depositan en la superficie terrestre, las capas de roca que finalmente se forman contienen evidencias de acontecimientos pasados que ocurrieron en la superficie. Por su propia naturaleza, las rocas sedimentarias contienen en su interior indicaciones de ambientes pasados en los cuales se depositaron sus partículas y, en algunos casos, pistas de los mecanismos que intervinieron en su transporte” (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005, p.202).

Es importante mencionar que las rocas sedimentarias contienen los fósiles, herramientas transcendentales para el estudio del pasado geológico; por ende, suministran a los geólogos la información básica necesaria para reconstruir los datos de la historia de la Tierra (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005).

2.9.2. Tipos de Rocas sedimentarias

El sedimento puede ser una deposición de material que se produce y es transportado en forma de clastos sólidos procedentes de la meteorización mecánica y química. Los depósitos de este tipo se designan detríticos y las rocas sedimentarias que forman se denominan rocas sedimentarias detríticas. Otra fuente de sedimento es el material soluble procedente en gran parte de la meteorización química, que al ser disuelto y posteriormente precipitado por procesos orgánicos o inorgánicos dan origen al material que compone a las rocas sedimentarias químicas (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005).

2.9.3. Rocas sedimentarias detríticas

Las rocas detríticas son rocas sedimentarias formadas de fragmentos consolidados de rocas y minerales almacenados mecánicamente, cuando éstas no están consolidadas se denomina depósito o sedimento (Tabla 2). La forma y el tamaño de los granos y la composición mineral de estas rocas, son de gran importancia para el estudio de las rocas detríticas (el tamaño del clasto es la base para el estudio de rocas sedimentarias), además de suministrar información ventajosa referente a los ambientes deposicionales. Las corrientes de agua o de aire transportan los clastos por tamaños, es decir que entre mayor sea el tamaño del clasto, más fuerte es la corriente (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005; Nichols, 2009).

Tabla 2: Clasificación de las rocas detríticas según el tamaño del clasto.

Intervalos de tamaño (milímetros)	Nombre del clasto	Nombre del sedimento	Roca detrítica
64-256 >256	Bloque	Grava	Conglomerado o brecha
2-4 4-64	Canto	Grava	Conglomerado o brecha
1/16-2	Grano	Arena	Arenisca
1/256-1/16	Gránulo	Limo	Limolita
<1/256	Partícula	Arcilla	Lutita

Fuente: Tarbuck, Lutgens y Tasa (2005).

Puede encontrarse gran variedad de fragmentos y minerales de roca en las rocas detríticas, los constituyentes fundamentales de estas rocas son los minerales de arcilla y el cuarzo; mientras tanto en la meteorización química de los silicatos los minerales de arcilla son el producto más cuantioso, sobre todo de los feldespatos, teniendo en cuenta que la meteorización química convierte estos minerales (feldespatos y micas) en nuevas sustancias rápidamente, su apariencia en las rocas sedimentarias revela que la deposición y la erosión fueron suficientemente rápidas como para depositar algunos de los minerales primordiales de la roca original antes de que consiguieran descomponerse (Tarbuck, Lutgens y Tasa, 2005).

2.10. Estratigrafía

La estratigrafía se considera como la relación que existe entre las rocas y el tiempo geológico; las cuales se determinan mediante la observación, descripción e interpretación a través de la evidencia directa y visible en las rocas, a fin de establecer la historia de la tierra (Nichols, 2009).

La estratigrafía facilita los marcos temporales para las ciencias geológicas. Las edades relativas de las rocas y los acontecimientos que se registran en esas rocas pueden establecerse mediante simples relaciones estratigráficas ya que en cada capa existe una diferencia marcada del tiempo y la historia de estas, cada capa es más longeva que la siguiente (Nichols, 2009).

2.11. Facies: Asociaciones de facies

Una facie es cuerpo o volumen de roca con características determinadas, que indican las condiciones en que éstas fueron formadas (Reading, 1996). Para determinar el proceso de formación de facies, es necesario describir las facies de un cuerpo sedimentario incluyendo todos los datos acerca de las características litológicas, textura, estructuras sedimentarias y contenido fosilífero.

Al examinar las asociaciones de facies es viable determinar las combinaciones de procesos que fueron dominantes en determinado ambiente. Los rasgos de un ambiente de deposición son establecidos por los procesos que están presentes, por consiguiente, existe un vínculo entre los ambientes de deposición y las asociaciones de facies (Nichols, 2009).

2.11.1. Litofacies

Una litofacies es definida como un cuerpo de roca o sedimento con características específicas como litología, estructuras, contenido fosilífero o color. Puede ser una simple capa o un grupo de ellas. Idealmente, ésta debería ser una roca distintiva que se formó bajo ciertas condiciones de sedimentación, reflejando procesos particulares (Reading, 1996).

2.12. Hidrofacies

El término hidrofacies se utiliza para denominar a una unidad sedimentológica homogénea o una unidad hidrogeológica homogénea pero no precisamente isotrópica (Anderson y Woessner, 1992). Desarrollada bajo entornos característicos que llevan a propiedades hidráulicas características (Klingbeil *et al.*, 1999). Es una o el conjunto de varias litofacies con idénticas propiedades hidráulicas (Medina, 2016).

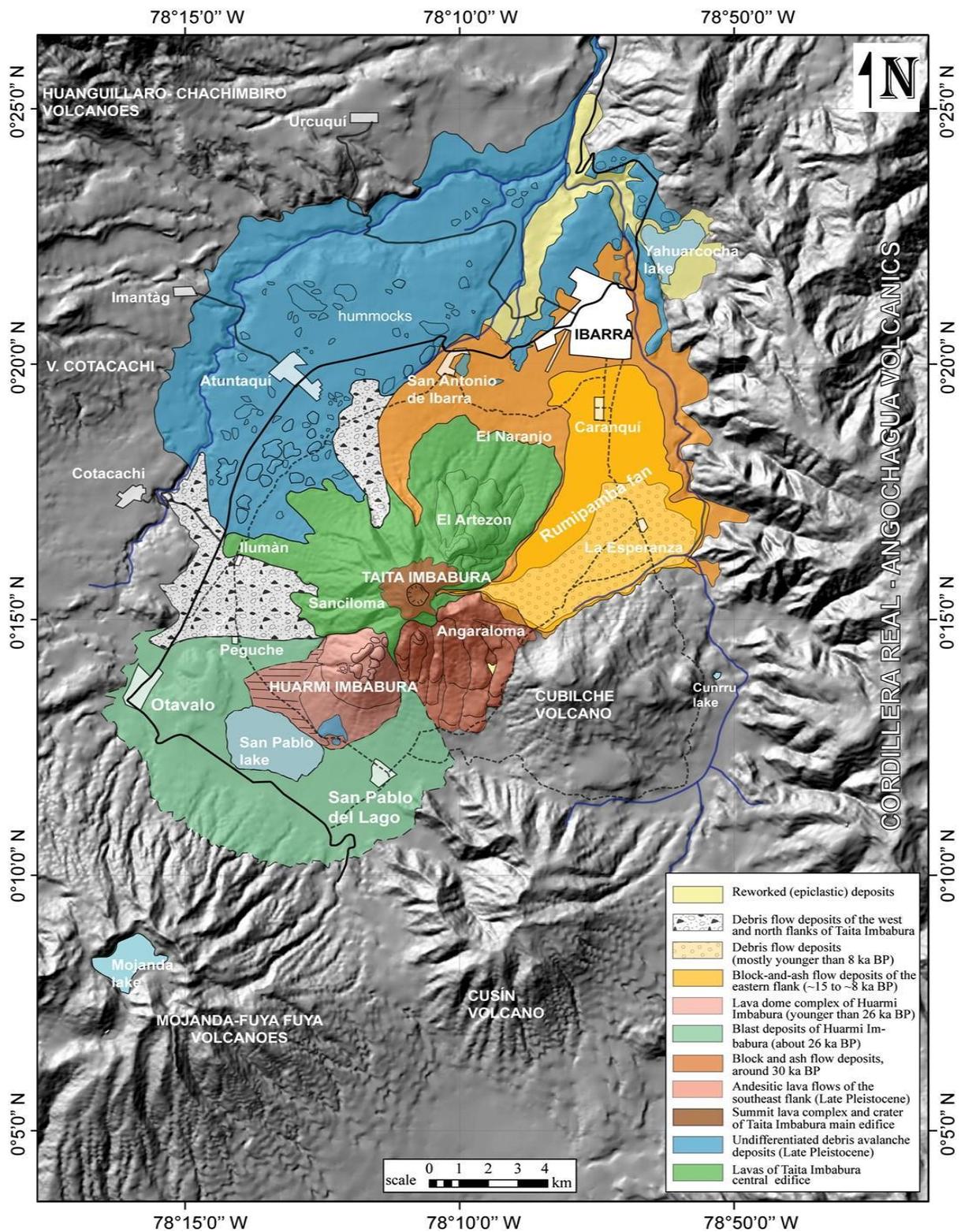
2.13. Geología Regional

La geología estudia acerca de la composición y estructura interna de la Tierra, además de los procesos responsables de su evolución a lo largo del tiempo geológico. La cordillera de los Andes es el resultado de un proceso orogénico consecuencia de la colisión entre la placa de

Nazca y la placa Sudamericana mediante un proceso de subducción, esta cordillera de los Andes en Ecuador presenta una orientación NNE-SSO y tiene una anchura aproximada de unos 190 a 170 km considerando la línea de contorno de los 500 m. Uno de los accidentes tectónicos más importantes que configuran el orógeno es un sistema de fallas de desgarre transpresivas con movimiento dextral. Estas fallas se extienden desde el golfo de Guayaquil donde se une el límite de placa en la fosa oceánica, discurre hacia el norte dentro de la cordillera partiéndola en dos y se extiende hacia el N dentro de Colombia y Venezuela hasta unirse con el límite de placa del mar Caribe. Esta gran falla individualiza un gran bloque litosférico dentro de la placa Sudamericana conocido como bloque Norandino.

El sector de la cordillera de los Andes en Ecuador está compuesto de dos cadenas montañosas: la cordillera occidental y la cordillera Real. Estas dos elevaciones están separadas por una depresión tectónica denominada depresión interandina (Aspden y Litherland, 1992). Dentro de esta depresión se localiza la zona de estudio de este trabajo. Los Andes septentrionales ecuatorianos se encuentran ubicados en el denominado bloque Nor-Andino (Pennington, 1981; Kellogg y Bonini, 1982; Gutscher *et al.*, 1999), cuya dinámica está controlada por la interacción entre las placas convergentes Nazca, Sudamérica y Caribe.

En Ecuador el proceso de convergencia de placas ha sido el generador del vulcanismo, levantamiento y deformación en el borde occidental de Sudamérica. Este accidente tectónico alberga a la mayor parte de los volcanes presentes en el Ecuador y aparece relleno por cientos de metros de materiales resultado de su actividad (Hall, Samaniego, Le Pennec, y Johnson, 2008). Estos materiales volcánicos son muy erosionables por lo que van a ser fácilmente trabajados por los sistemas fluviales, esto hace que su acción quede bien registrada en el relieve en forma de diferentes rasgos geomorfológicos como con el desarrollo de profundos y escarpados valles (quebradas) o terrazas fluviales. En este trabajo se ha estudiado una de las terrazas fluviales del río Tahuando. Esta terraza que presenta una potencia de hasta 30 m descansa entre los materiales volcánicos del volcán Imbabura y los de la sierra de Angochagua.



Mapa 1: Mapa geológico del volcán Imbabura
Fuente: (Ruiz, 2003) modificado en Pennec (2011).

2.14. Marco legal

El marco legal del proyecto se basa en normativas establecidas desde La Constitución de la República del Ecuador (2008), hasta ordenanzas municipales que acogen a la zona de estudio, enfocadas en la protección del medio ambiente.

Constitución del Ecuador (Capítulo séptimo - Derechos de la naturaleza)

Título II - Derechos, Capítulo Segundo - Derechos del buen vivir, Sección segunda - Ambiente sano Art.14: Derecho de la población para vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado; Título II - Derechos, Capítulo Séptimo - Derechos de la naturaleza; Título VI - Régimen de Desarrollo, Capítulo Primero - Principios generales Art. 276 numeral 4: Recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso permanente y de calidad al agua, aire y suelo, y a los beneficios de los recursos des subsuelo y del patrimonio natural; Título VII – Régimen del Buen Vivir, Capítulo Segundo – Biodiversidad y recursos naturales, Sección Sexta – Agua Art. 411: El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua y Art. 412: La autoridad a cargo de la gestión del agua será responsable de su planificación, regulación y control. Esta autoridad cooperará y se coordinará con la que tenga a su cargo la gestión ambiental para garantizar el manejo del agua con un enfoque ecosistémico; Título VII – Régimen del Buen Vivir, Capítulo Segundo - Biodiversidad y recursos naturales, Sección Séptima - Biosfera, ecología urbana y energías alternativas (Constitución Política de la República del Ecuador, 2008).

Plan Nacional del Buen Vivir

Objetivo 3. Mejorar la calidad de vida de la población: Señala como responsabilidad del estado proteger a las personas, colectividades y naturaleza, estableciendo los derechos del buen vivir (agua, alimentación, salud, educación y vivienda), para lograr las condiciones y el fortalecimiento de capacidades individuales y sociales. Además de profundizar el reencuentro con la naturaleza, para vivir en un ambiente sano y libre de contaminación (SENPLADES, 2013).

Objetivo 7. Garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global: La Constitución de la república del Ecuador reconoce los derechos de la naturaleza, como una respuesta contundente a su estado actual, orientando sus esfuerzos al respeto integral de su existencia, a su mantenimiento, y la regeneración de sus ciclos vitales y procesos evolutivos (SENPLADES, 2013).

Objetivos del Desarrollo Sostenible de la ONU

Objetivo 6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos: El agua libre de impurezas y accesible para todos es parte esencial del mundo en que queremos vivir. Hay suficiente agua dulce en el planeta para lograr este sueño. La escasez de recursos hídricos, la mala calidad del agua, el saneamiento inadecuado influye y sobre todo el desconocimiento de las fuentes tanto actuales como nuevas podrían actuar negativamente en lograr este objetivo. Para 2050, al menos una de cada cuatro personas probablemente viva en un país afectado por escasez crónica y reiterada de agua dulce (ONU, 2008).

Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.

La presente ley de aguas garantiza la conservación y el control para la contaminación con el fin de proteger este recurso y sea aceptable, asequible para uso recreacional y doméstico. Los artículos relacionados con la investigación son:

Art. 20: A fin de lograr las mejores disponibilidades de las aguas, el Consejo Nacional de

Recursos Hídricos, prevendrá, en lo posible, la disminución de ellas, protegiendo y desarrollando las cuencas hidrográficas y efectuando los estudios de investigación correspondientes.

Art. 21: El usuario de un derecho de aprovechamiento, utilizará las aguas con la mayor eficiencia y economía, debiendo contribuir a la conservación y mantenimiento de las obras e instalaciones de que dispone para su ejercicio.

Art. 22: Prohíbese toda contaminación de las aguas que afecte a la salud humana o al desarrollo de la flora o de la fauna.

Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización.

Art. 136. Ejercicio de las competencias de gestión ambiental: Determinando las competencias que debe asumir cada municipio enfocado en la gestión ambiental, señala que corresponde a cada uno de los gobiernos provinciales gobernar, dirigir u organizar la gestión ambiental, la defensoría del ambiente y la naturaleza en su territorio, en el marco del sistema nacional descentralizado de gestión ambiental y en concordancia con las políticas emitidas por la autoridad ambiental nacional (COOTAD, 2010).

CAPÍTULO III

3. Materiales y Métodos

A continuación, se detalla las características del área de investigación, los materiales y la metodología que se utilizó para la realización del trabajo.

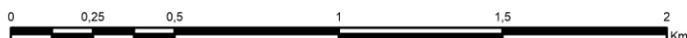
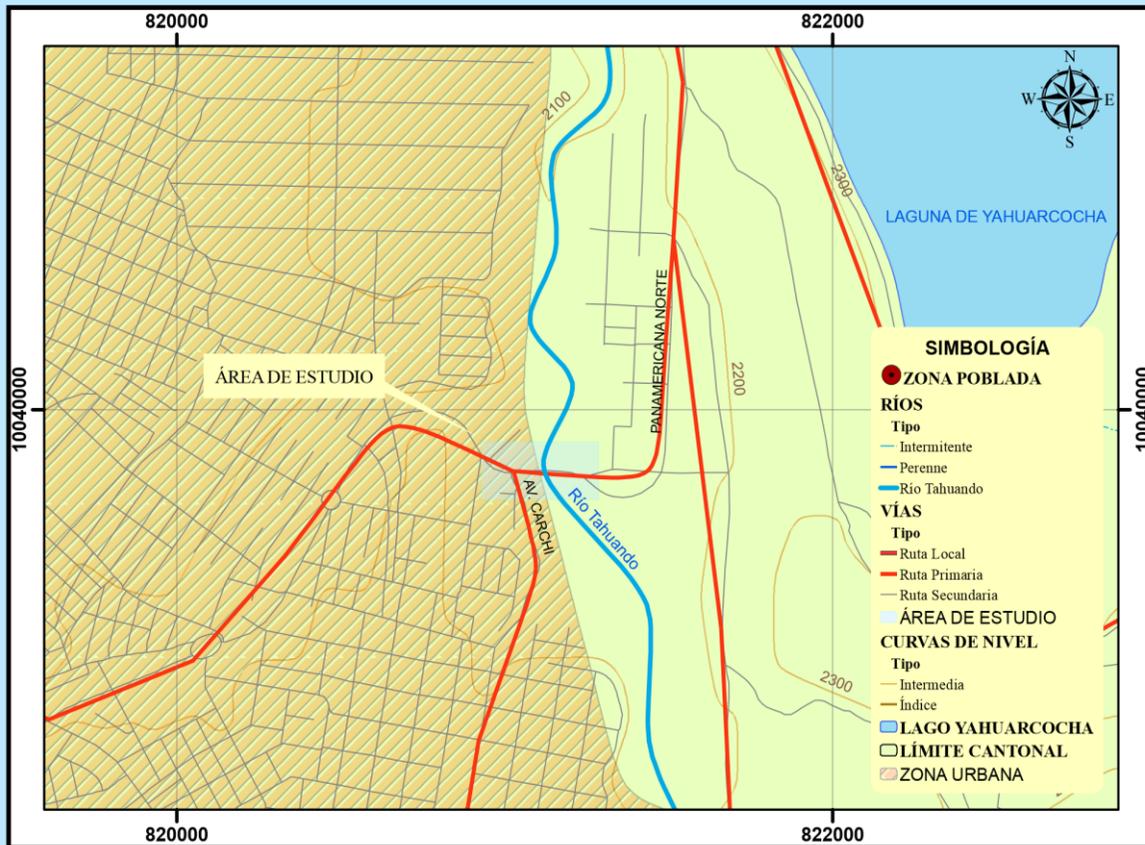
3.1. Caracterización del área de estudio

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.

MAPA DE UBICACIÓN DE LA TERRAZA FLUVIAL DEL RÍO TAHUANDO, PARROQUIA EL SAGRARIO, CANTÓN IBARRA, PROVINCIA IMBABURA

Mapa 2: Ubicación del área de estudio



PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR
DATUM WGS 1984
ZONA 17 HEMISFERIO SUR

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

MAPA BASE DEL ÁREA DE ESTUDIO

ESCALA DE ELABORACIÓN	ESCALA DE IMPRESIÓN	MAPA
1:50.000	1:20.000	1 DE 1

ELABORADO POR:

LENNIN VILLEGAS

GÉNESIS MERO

FUENTE:

IGM, 2013

3.1.1. Clima

Ubicado entre los rangos delimitantes propuestos por Pourrut (1983), el área de estudio se encuentra en un clima ecuatorial mesotérmico semihúmedo a húmedo. Los registros del INAMHI hasta el año 2013 denotan que para la ciudad de San Miguel de Ibarra se presentan tres meses secos: enero, julio y agosto, en los cuales se presenta una ligera sequía en la ciudad; a su vez existen nueve meses húmedos, en los cuales existe una constante precipitación.

Los 19 anuarios meteorológicos históricos (41 años) determinan una temperatura media de 15.90° C, con una variación mínima menor a 0.3°C. Los registros promedian una temperatura máxima media entre los 20 y 25° C y una mínima media entre los 7 y 11° C. Los vientos promedios son del orden de 7 m/s como máximo y de 3.5 m/s, como mínimos. El análisis hidrometeorológico determina que las precipitaciones son 600mm dentro de la zona de estudio.

3.1.2. Hidrología

En la cuenca hidrogeológica sobre la que se encuentra la ciudad de Ibarra se han identificado dos zonas de recarga hídrica y una de acumulación. Esta cuenca se extiende desde la confluencia de los ríos Tahuando y Chorlaví al norte hasta las cumbres de los Complejos Volcánicos Imbabura y Cubilche al Sur y Sur-Este. Su límite occidental es la población de San Antonio de Ibarra, mientras que su límite oriental son los páramos de la sierra de Angochagua (Bolívar Núñez, 2005). La dirección de esta cuenca coincide con el lineamiento extendido por el río Tahuando que posiblemente están condicionado por una falla. El caudal que aporta al acuífero de Ibarra es de 820 l/s (Bolívar Núñez, 2005).

La zona de acumulación ha sido definida utilizando varios parámetros. El límite norte se lo ha definido la confluencia de los ríos Tahuando y Chorlaví, por cuanto en esta zona existe la

presencia de vertientes que se consideran como la descarga del acuífero. Uno de los parámetros que ayudó a determinar el límite sur es el cambio de pendiente existente a partir de los 2300 msnm en las laderas del volcán Imbabura que de acuerdo al estudio geofísico coincide con el límite de los flujos basales de lavas (permeabilidad baja) que entran en contacto con los flujos piroclásticos del Imbabura y flujos de avalancha tanto del Imbabura como del Cubilche, estos últimos presentan características de permeabilidad muy altas (Bolívar Núñez, 2005).

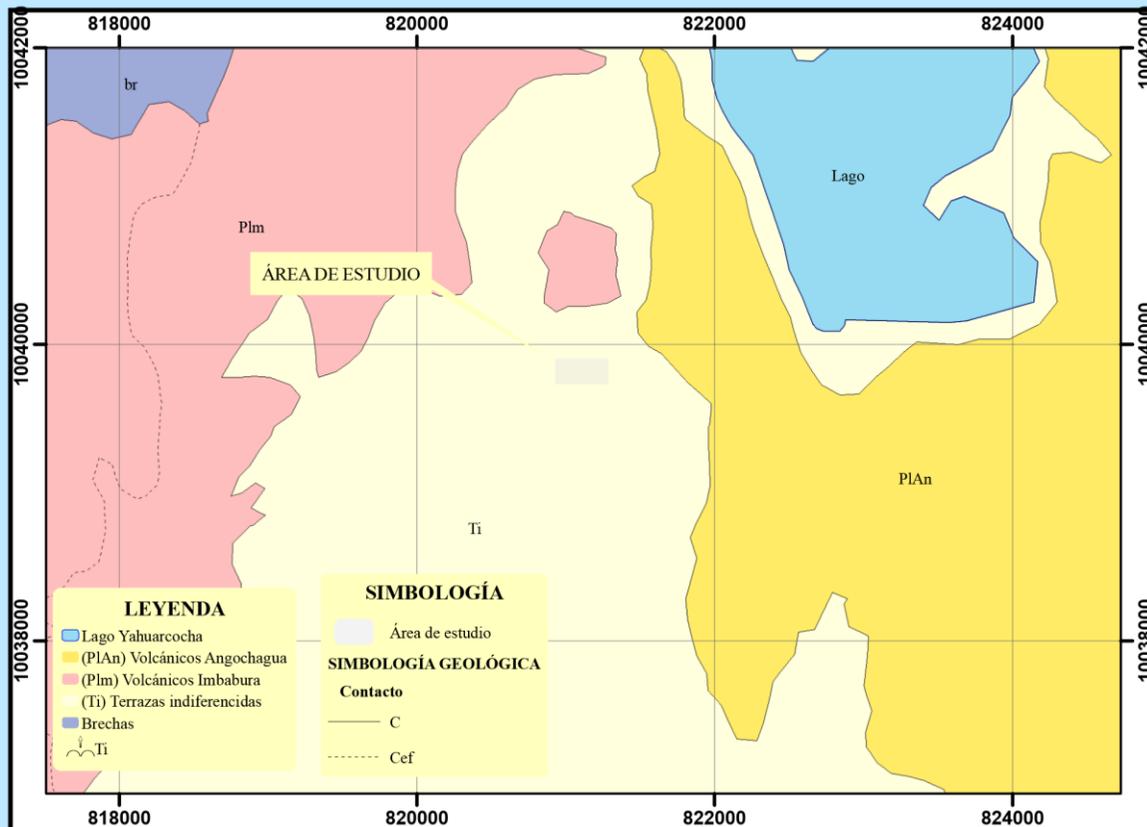
3.1.3. Geología local

El volcanismo alcanzó su madurez durante el periodo Pleistoceno con la representación de los estratos-volcanes que han formado gran parte de las rocas que emergen en la hoja geológica. Estos fueron erosionados potentemente por la actividad glacial pleistocena y dieron lugar a la formación de potentes flujos de lodo. Los movimientos epirogénicos fueron los encargados de la formación de terrazas a lo largo de los principales ríos, además la erosión sigue provocando el establecimiento de sedimentos coluviales y aluviales.

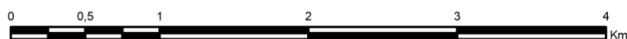
El Volcán Imbabura mantiene intacto una considerable estructura de su cono, siendo uno de los más jóvenes (Pleistoceno superior). Un gran flujo de lava procedente de este volcán llega hasta las zonas circundantes de la ciudad, además gran cantidad de brechas volcánicas procedentes del Imbabura han seguido el cauce de los ríos Chorlaví y Tahuando (Mapa Geológico Ecuador, 1982).

MAPA GEOLÓGICO DE LA TERRAZA FLUVIAL DEL RÍO TAHUANDO, PARROQUIA EL SAGRARIO, CANTÓN IBARRA, PROVINCIA IMBABURA

Mapa 3: Geología del área de estudio



LEYENDA		SIMBOLOGÍA	
	Lago Yahuarcocha		Área de estudio
	(PIAn) Volcánicos Angochagua		CONTACTO
	(Plm) Volcánicos Imbabura		Cef
	(Ti) Terrazas indiferenciadas		
	Brechas		
	Ti		



PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR
DATUM WGS 1984
ZONA 17 HEMISFERIO SUR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE		
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES		
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES		
MAPA BASE DEL ÁREA DE ESTUDIO		
ESCALA DE ELABORACIÓN	ESCALA DE IMPRESIÓN	MAPA
1:50.000	1:20.000	1 DE 1
ELABORADO POR:		FUENTE:
LENNIN VILLEGAS		IGM, 2013
GÉNESIS MERO		

3.2. Materiales

Los materiales empleados en la investigación se los catalogó como insumos, equipos y programas.

Equipos	Software	Materiales e insumos
Laptop Cámara fotográfica Estereoscopio Leica DM750	Microsoft office Adobe illustrator ArcGis 10.2 Auto Stich	Brújula Cinta métrica y regla Lupa Martillo de geólogo Hojas milimetradas

3.3. Metodología

Los procesos metodológicos y técnicas fueron seleccionados de acuerdo con las características del tema de investigación, el problema, los objetivos y las preguntas directrices.

En la actualidad es muy común que la industria petrolera lleve a cabo el estudio de la sedimentología y estratigrafía de afloramientos de diferentes tipos de unidades geológicas con el fin de ser utilizados como análogos para comprender las características internas de los yacimientos petrolíferos (Miall y Tyler, 1991). Huggenberger y Aigner (1999) proponen aplicar el mismo método para el estudio de los sedimentos que albergan agua subterránea. Para el presente estudio se utilizó el método de Miall (1996), que integra varias actividades utilizadas en las disciplinas de estratigrafía y sedimentología.

3.3.1. Identificación de litofacies e hidrofacies; descripción de la arquitectura fluvial y evolución vertical del depósito.

El método de Miall (2006) es utilizado para los objetivos 1 y 2, tomando en cuenta la relación que existe entre estos al momento de desarrollar el estudio.

Para realizar la identificación de litofacies, la arquitectura estratigráfica del depósito y evolución vertical. 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) (ver Anexo 4).

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 (ver anexo 5 y 6).

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 (ver Anexo 2).

3.3.2. Características hidrogeológicas de estos 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.

CAPÍTULO IV

4. Resultados y Discusión

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos luego de realizar el trabajo de campo dentro de la investigación.

La terminología utilizada durante la redacción de los resultados se definen en el glosario de términos (ver Anexo 1).

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 (Fig. 4). 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 acuñaamiento de algunas de las unidades (Fig. 4).

Unidad 1: 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. 4) 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.

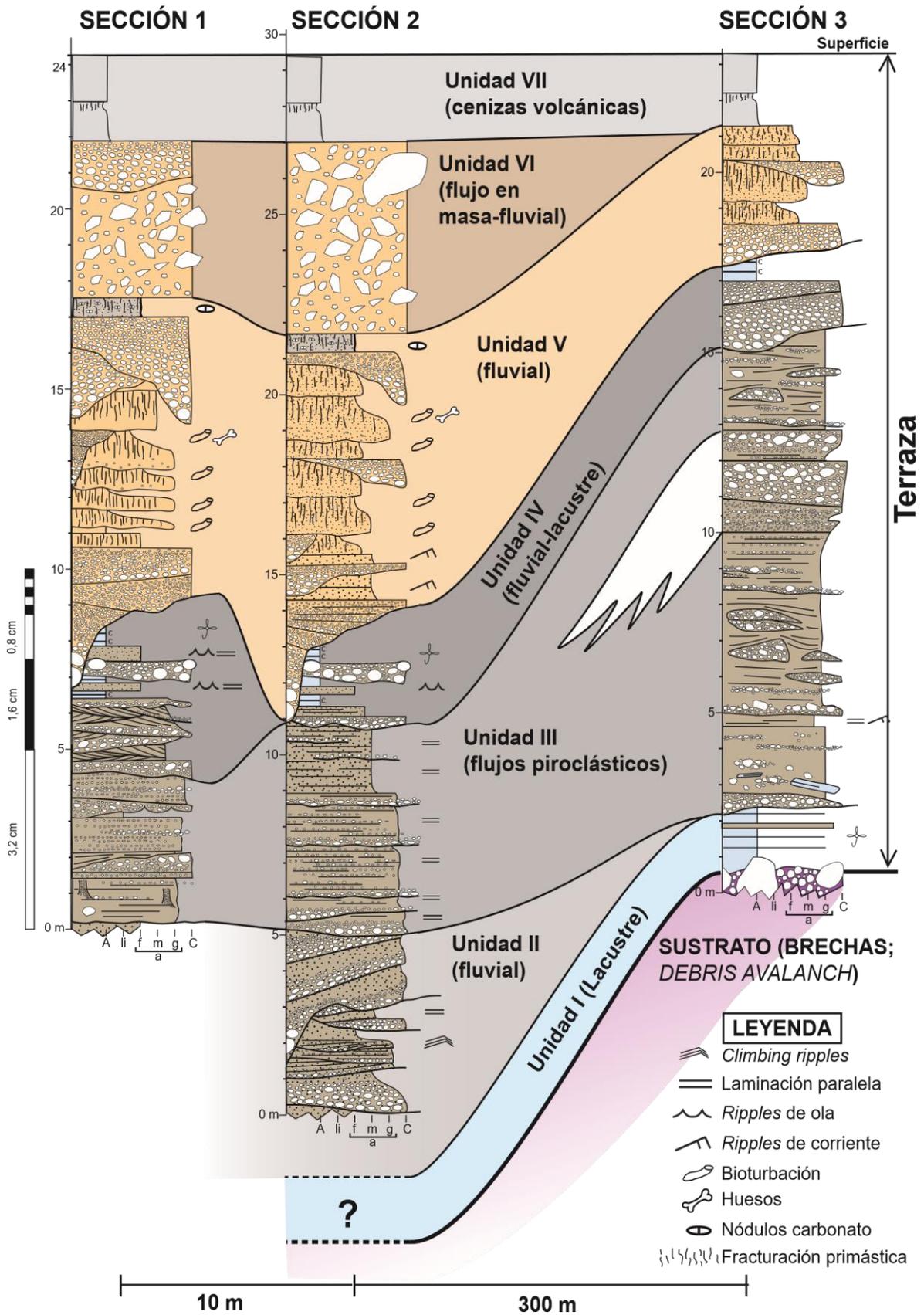


Figura 4: Panel de correlación elaborado a partir de las secciones realizadas
Elaboración: G. Mero y L. Villegas.

Unidad II: Se caracteriza por presentar secuencias granodecrecientes 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 granodecreciente 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.

Unidad III: Presenta un espesor aproximado de 13 m en la margen O del río (sección 3; Fig. 4) y se adelgazada hasta los 4,5 m hacia el E (sección 1; Fig. 4). 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.

Unidad IV: Formada por dos tramos, el inferior por canales rellenos con conglomerados y arenas en secuencias granodecrecientes con superficies de acreción lateral y estratificaciones cruzadas en surco. Por otro lado, el tramo superior está integrado por arcillas de color blanco en estratos centimétricos a decimétricos con abundantes restos vegetales flotados e intercalaciones de menos de 5 cm de sedimentos orgánicos. Intercalados con las arcillas también aparecen arenas de grano medio, bien clasificadas y con laminación de *ripples* simétricos de oleaje. En la parte media de este tramo arcilloso aparece un estrato con base ligeramente erosiva de conglomerados masivos o con una grosera estratificación cruzada. En las arcillas ocasionalmente aparece bioturbación animal con estructuras de escape. El techo de esta unidad es una prominente superficie erosiva sobre la que descansa la unidad V.

Unidad V: Está formada por una sucesión exclusivamente fluvial, los conglomerados presentan una litología con clastos de mayor densidad de color gris oscuro con fenocristales de plagioclasa posiblemente de composición andesítica.

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.

Unidad VII: La sucesión estratigráfica de la terraza finaliza con esta unidad, 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.

4.2. Facies y asociaciones de facies

La descripción de las facies, asociación de facies y su interpretación han sido puntualizadas en los cuadros 1, 2 y 3.

4.2.1. Asociaciones de facies fluviales y lacustres

Para la descripción e interpretación de los depósitos fluviales y lacustres se basa en la tabla establecida por Miall (2006). En estos depósitos se han identificado 15 facies y 5 asociaciones de facies.

A continuación, se detallan cada una de las facies y asociaciones de facies, mismas que fueron asignadas nombres y códigos.

Asociación de facies lacustres (AF-la): arcillas blancas con intercalaciones arenosas y conglomerados.

Descripción. Esta asociación de facies forma tramos tabulares de hasta 2 m de espesor formados por arcillas, arenas y conglomerados. En la sucesión de la terraza esta asociación se encuentra de dos tramos uno en la parte inferior y otro en la parte media. Esta asociación está integrada por arcillas blancas laminadas o masivas (**facies Flm**) con abundantes restos vegetales dispersos o concentrados en láminas (**facies C**) (Fig. 5). Las arcillas masivas presentan de forma dispersa cierta bioturbación en forma de galerías subverticales con

estructuras de escape (Fig. 10A). En el tramo inferior de esta asociación se han encontrado unos restos de fósiles microscópicos no identificados (**facies Fsn**) (Fig. 8B); además de trazas vegetales, principalmente raíces (Fig. 10B). Alternando con las arcillas aparecen estratos tabulares de arenas de grano desde muy fino a muy grueso con espesores entre 1 a 30 cm. En el tramo inferior las arenas con menor potencia presentan estructuras de carga en la base y gradación normal (**Facies Sg**), formadas por líticos y cristales.

En el tramo de esta asociación en la parte superior de la serie las arenas son más maduras y están mejor clasificadas, contienen laminación paralela y de *ripples* simétricos (**facies Sp y Srs**) (Fig. 8A). En este tramo aparecen intercalados estratos lenticulares de hasta 70 cm de espesor y más de 10 m de longitud con bases ligeramente erosivas, masivos o con una grosera estratificación cruzada, clastosoportados, heterométricos con clastos de composición desde dacitas a andesitas subangulosos a bien redondeados (**facies Gmh**).



Figura 5: Facies carbonáticas, Fósil vegetal (Fv)
Elaboración: G. Mero y L. Villegas.

Interpretación. Las facies de arcillas blancas laminadas son interpretadas como sedimentación por decantación a partir de una masa de agua inmóvil (Collinson y Thompson, 1982). La laminación paralela indicaría sedimentación en el fondo con escasa fauna que removiera el sedimento, estas condiciones se dan cuando existe elevada tasa de sedimentación (MacEachern *et al.*, 2005). Las arcillas masivas son las que contienen trazas fósiles, aunque presentan un índice bajo de bioturbación. Por ello, la ausencia de estructura de arcillas es resultado de una sedimentación a partir de flujos de fango de fondo (Collinson y Thompson, 1982).

La facies de arenas gradas en estratos delgados y láminas, debido a la gradación normal son interpretadas como flujos de sedimentos con una componente turbulenta (Mulder y Alexander, 2001). Los conglomerados masivos, heterométricos y en estratos lenticulares son interpretados como sedimentación a partir de flujos de sedimentos densos clasto-soportados, correspondiendo a flujos de granos o flujos hiperconcretados (Mulder y Alexander, 2001).

Esta asociación de facies se interpreta como sedimentos depositados en medios lacustres. En ellos tendría lugar una sedimentación tranquila de arcillas en aguas de baja energía en las que ocasionalmente se producirían entradas de flujos cargados de sedimentos procedentes de los sistemas fluviales que desembocarían en él durante periodos de crecidas. Las arenas maduras y bien clasificadas con laminación paralela y de *ripples* oscilatorios se abrían formados en zonas marginales del lago influenciadas por el oleaje. Asociaciones de facies similares a estas han sido descritos por otros autores en medios lacustres (Nichols, 2009).

Asociación de canales conglomeráticos (AF-cc): conglomerados con barras de acreción lateral. (Fig. 6).

Descripción. Esta asociación de facies está formada por cuerpos lenticulares de bases cóncava y erosiva, simétrica, y de techo plano, de dimensiones de hasta 5m de espesor y 40m de anchura (Fig. 7). Las facies que componen esta asociación están formadas por conglomerados masivos de matriz arenosa clastosoportada que constituye el relleno basal del canal (**facies Gmm**) con clastos redondeados a muy redondeados, con tamaños hasta de 1m; forman estratos lenticulares irregulares que aparecen en el fondo y hacia unos de los márgenes del canal. En la parte superior presentan conglomerados organizados en *set* de hasta 2m de estratificación cruzada en surco (**facies Gt**), los conglomerados bien organizados y redondeados con buena clasificación.

En estas facies hacia arriba ocurre una disminución del tamaño de grano y un aumento en la fracción arenosa, desarrollando una secuencia general granodecresciente. En la parte superior de estos canales aparecen tramos lenticulares de arenas gruesas a muy gruesas de arenas conglomeráticas con estratificación cruzada en surco (**facies St**), y sobre ellas laminación horizontal (**facies Sh**).

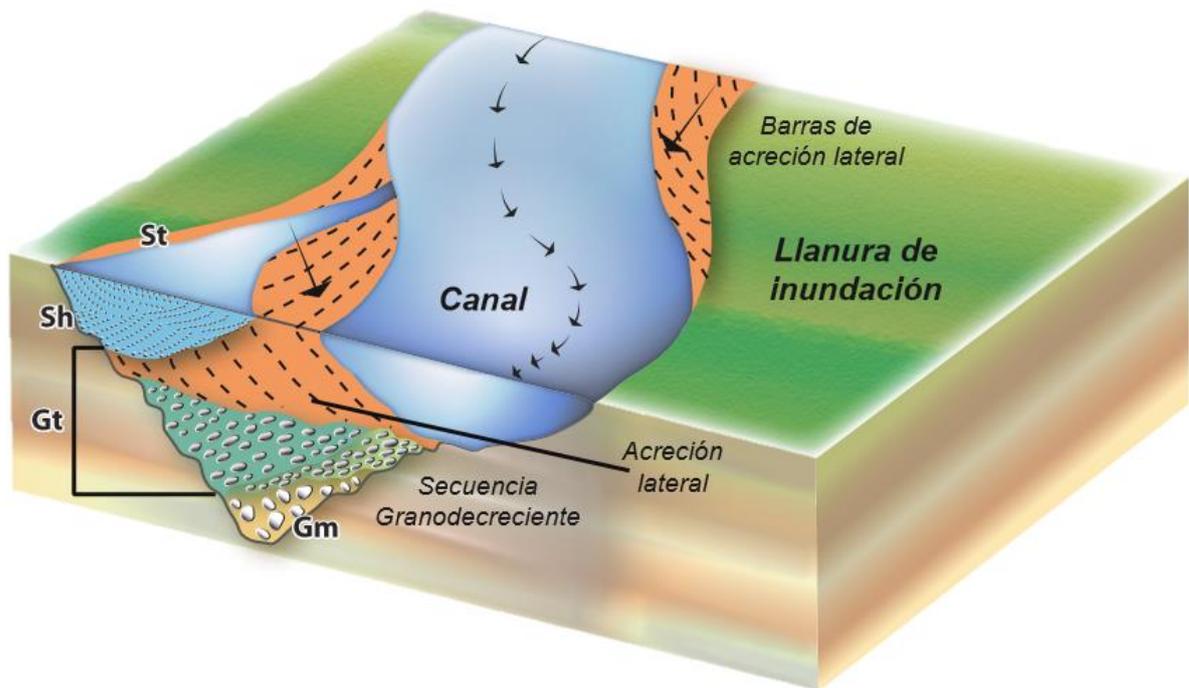


Figura 6: Esquema del canal. Facies: Arena, fina a muy gruesa, guijarrosa (Sh); Arena, fina a muy gruesa, guijarrosa (St); Grava estratificada (Gt) Grava fina (Gm).
Elaboración: G. Mero y L. Villegas.

Interpretación: La geometría, el tipo de relleno, la sucesión de facies y la disminución de tamaño de grano hacia el techo son características del relleno de canales fluviales, las facies Gmm de la base son barras de fondo que los clastos se transportan en masa como un flujo de granos que sufren una sedimentación rápida en el fondo del canal, es frecuente encontrar restos óseos, sobre ellas aparecen las facies Gt que se interpretan como barras pegadas al margen del canal, que crecen en diagonal a este. A medida que progresa el relleno del canal va disminuyendo la energía de la corriente esto se ve reflejado por una disminución del tamaño de grano y un aumento en la proporción de arena, al final de la secuencia del relleno del canal tiene lugar el depósito de las facies St y Sh que se interpreta como resultado de la migración de dunas arenosas de tipo lingüoides se desarrollan barras arenosas lingüoides, y lechos de fondo plano asociados a altos regímenes de energía.

Variando con la matriz masiva conglomerática, aparecen estratos con cantos imbricados, lenticulares, ubicados en acreción lateral, de hasta 7 cm de espesor. En el tramo superior los cantos se encuentran dispuestos en acreción lateral (**facies Gm**); en esta sección de la asociación en la parte superior de la serie la grava (conglomerado fino) se presenta con textura clasto sostén y moderada selección, con un espesor de aproximadamente 2 m. Estratificación difusa y gradación normal, seguida por un estrato entrecruzado ubicado lateralmente de 8 m de espesor por 10 m de longitud. (**facies Gh y Gt**; Fig. 9).

Asociación de canales conglomeráticos y arenosos tabulares (AF-cat): conglomerados y arenas con estratificación cruzada en surco.

Descripción: Está formado por cuerpos tabulares, con espesor hasta de 2,5 m constituido por secuencias granodecrecientes de 0,5 a 0,75 m. Estas tienen el límite inferior neto erosivo cóncavo, están formadas en la base por estratos lenticulares de 10 a 50 cm y anchura de 50 cm a 10 m de conglomerados masivos o con secuencias granocrecientes (**Facies Gmm**), con clasificación media, con clastos de hasta 50 cm subangulosos a subredondeados, con algunos clastos imbricados. Sobre ellos de forma abrupta o gradual se desarrollan arenas o arenas conglomeráticas de grano medio a grueso bien clasificadas con estratificación cruzada en surco **facies St**, y paralela **facies Sh**. En algunos casos las secuencias finalizan por arenas finas bien clasificadas, con laminación en forma de *ripples* (**Facies Sr**) y laminación horizontal (**Facies Sh**) (Fig. 8C).

Interpretación: Esta superposición de secuencias granodecrecientes con base erosiva en surco son características de sistemas de tipo *braided*, estas secuencias con bases erosivas cóncavas con conglomerados y encima arenas y arenas conglomeráticas con estratificación cruzada en surco y finalmente las arenas con *ripples* constituyen el relleno de pequeños canales. Esta asociación con morfología tabular que constituye cuerpos tabulares, caracterizada por la superposición de estos, formado por este tipo de canales es características de sistemas fluviales tipo *braided*. Los conglomerados masivos representarían barras en el fondo del canal en el que el sedimento se mueve en masa en el que el mecanismo de transporte sería de interacción entre granos o fluidificación.



Figura 7: Superficie erosiva (Se), Ripples (Ri).
Elaboración: G. Mero y L. Villegas.

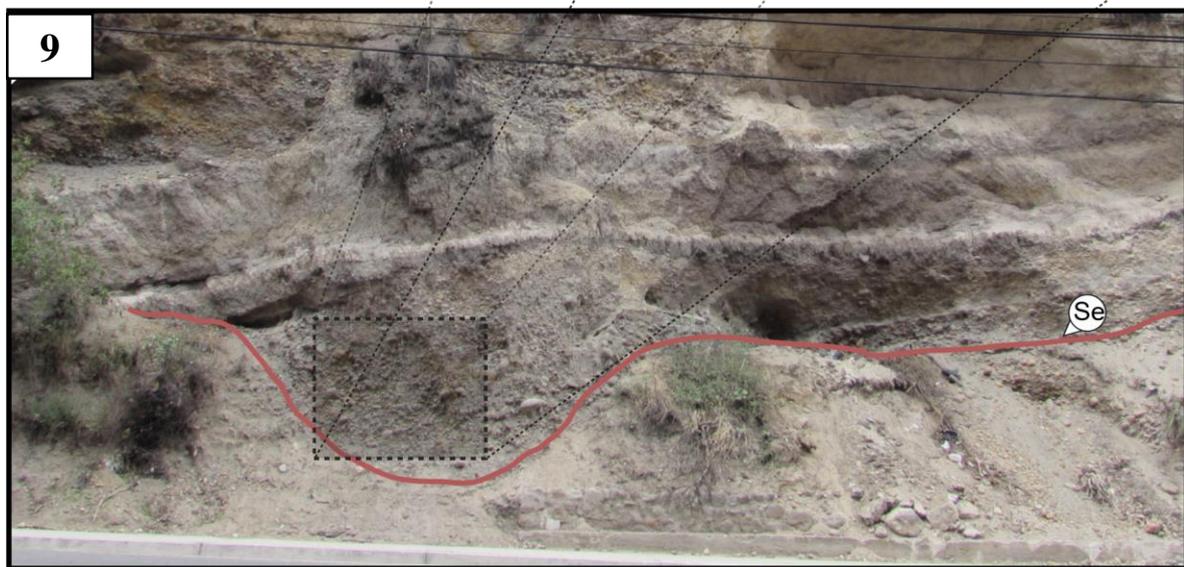
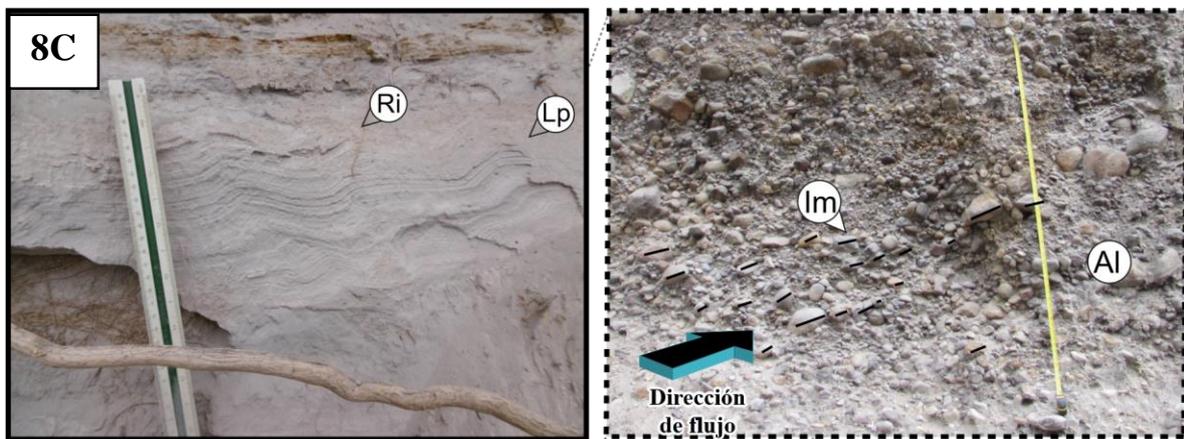
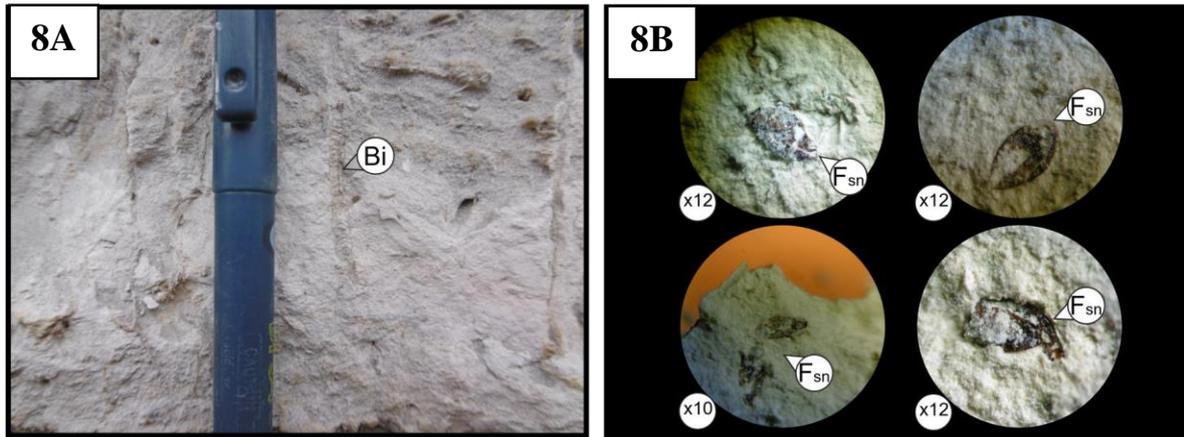


Figura 9: A. Bioturbación presente (Bi); B. Fósiles microscópicos no identificados (Fsn); C. Arenas maduras y finas con laminación paralela (Lp) y horizontal, ripples (Ri).

Figura 8: Estratificación difusa y gradación normal con cantos imbricados (Im) y acreción lateral (Al); Superficie erosiva (Se).

Elaboración: G. Mero y L. Villegas.

Asociación de paleosuelos (AF- p): Arenas limosas y arcillosas.

Descripción: Esta asociación está formada por estratos desde 10 cm hasta 1 m tabulares de base neta ligeramente erosiva desarrollando una secuencia granodecreciente. Estos estratos son masivos y formados por arenas con cantos dispersos mal clasificada con abundante matriz de limo y arcilla de color beige claro, y presenta una textura subangular *blocky* (Fig. 11B). Incluidos dentro de estos estratos se han encontrado restos oseos pertenecientes a un venado joven (Rodríguez, L. Com. Pers) (Fig. 11A). Estos depósitos también presentan de forma dispersa bioturbación en forma de galerías (Fig. 10 A). Algunos de estos estratos presentan colores grises oscuro.

Interpretación: Las secuencias granodecrecientes que forman estos estratos junto con el sedimento mal clasificado masivo formando los estratos tabulares presentan características propias de sedimentos depositados a partir de flujo en masa. Este tipo de depósitos está asociado a flujo de desbordamiento en una llanura de inundación lateralmente a un canal fluvial, estos desbordamientos tienen un carácter catastrófico que arrastrarían a animales o cuerpos de animales que se encontraran en la llanura de inundación. Estos depósitos de desbordamiento posteriormente serían sometidos a un intenso proceso de edafización. El color gris oscuro de algunos de los estratos indicaría una elevada producción de materia orgánica en el suelo y condiciones reductoras en su interior.

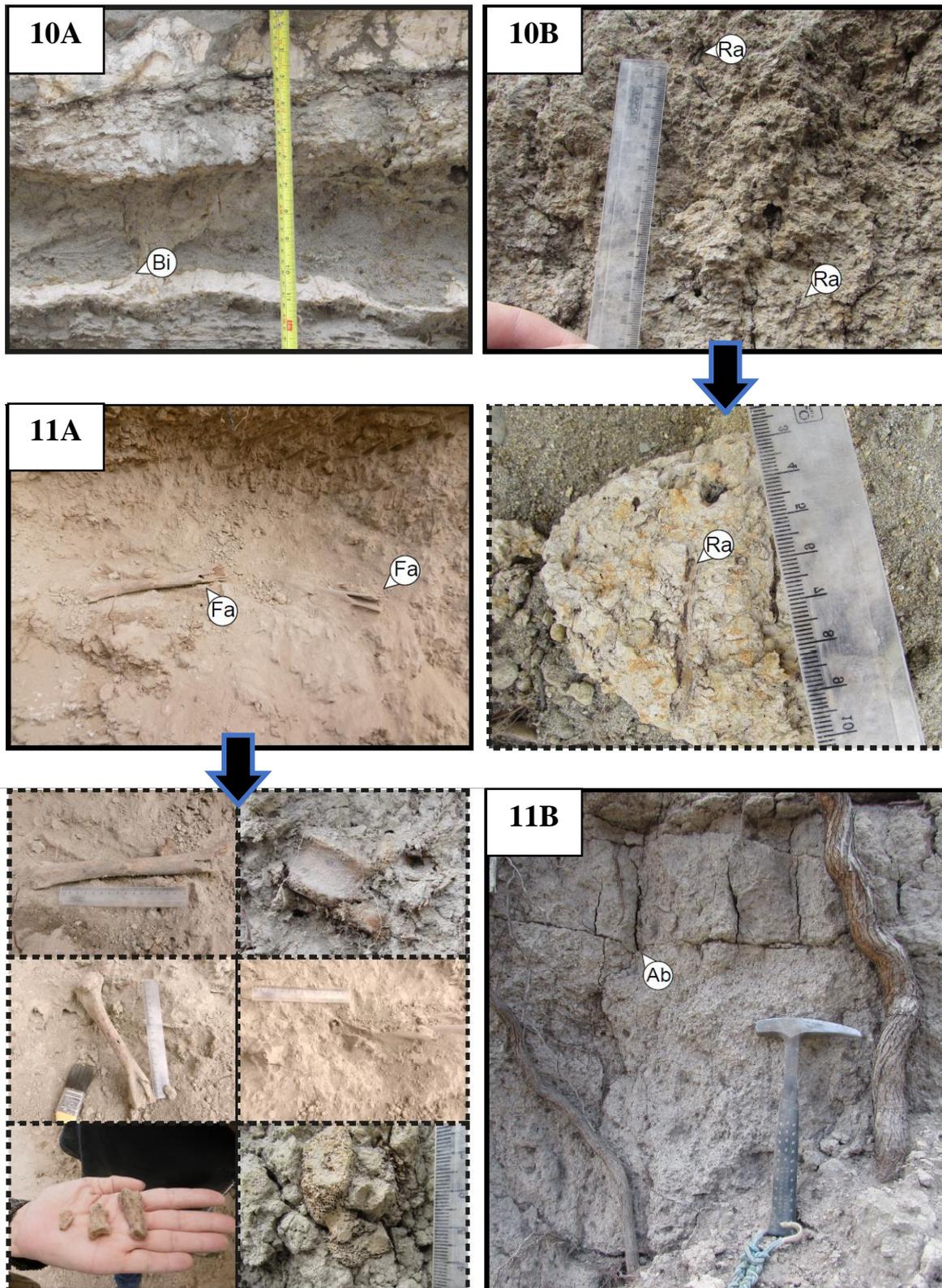


Figura 10: A. Bioturbación presente en el escarpe (Bi); B. Raíz actual (Ra).
Figura 11: A. Fósil animal (Fa); B. Representación de angular blocky (Ab).

Elaboración: G. Mero y L. Villegas

Cuadro 1: Descripción e interpretación de facies fluviales (facies lacustres)

Código de facies	Facies	Litología	Estratificación: morfología, límites y espesor	Estructuras sedimentarias, fósiles y otros rasgos	Interpretación (descripción del proceso)
Flm	Arcillas blancas, laminadas o masivas.	Arcillas blancas-gris muy claro	Estratos tabulares; masivos o laminados; centimétricos hasta 50cm; límites netos	Laminación paralela	Decantación en una masa de agua inmóvil
Sg	Arena de grano medio a muy grueso	Arenas gradadas con líticos	Estratos tabulares; base irregular; techo neto y plano; espesor de menos de 5cm	Gradación normal, estructuras de carga	Flujos de sedimentos turbulentos
C	Carbonada	Fango	Estratos de hasta 1m	Imprantas de plantas en el fango	Depósitos ricos en vegetación
Srs	Arenas con <i>ripples</i> simétricos	Arenas maduras muy finas a medias	Estratos tabulares centimétricos	Laminación cruzada de <i>ripples</i> simétricos	Flujos acuosos con una componente oscilatoria
Gmh	Conglomerados masivos heterométricos	Conglomerados entre 5 a 30 cm de tamaño de grano	Estratos lenticulares; base ligeramente erosiva hasta 70 cm de espesor.	Estructuras masivo, o estratificación cruzada mal definida	Flujos en masa densos clastosoportados
Fsn	Limo, fango	Limo, fango	Estrato masivo	Masivas con fracturación prismática	Canal abandonado
Sp	Arenas gruesas a muy gruesas	Arenas gruesas	Estratificación cruzada en surco	Laminación paralela y de <i>ripples</i> simétricos	
Bms	Brechas matriz soportadas	Brechas	Estratos tabulares de hasta 5 m de espesor, de base y techo netos	Matriz soportados y con gradación inversa, clastos de hasta 1 m de tamaño	Flujos en masa matriz soportados (Coussot y Meunier, 1996).

Fuente: (Collinson y Thompson, 1982; MacEachern *et al.*, 2005; Mulder y Alexander, 2001; Nichols, 2009).

Elaboración: G. Mero y L. Villegas

Cuadro 2: Descripción e interpretación de facies fluviales (canales conglomeráticos)

Código de facies	Facies	Litología	Estratificación: morfología, límites y espesor	Estructuras sedimentarias, fósiles y otros rasgos	Interpretación (descripción del proceso)
Gm	Grava fina	Conglomerados finos	Textura clasto sostén y moderada; con espesor de aproximadamente 2m	Acreción lateral	Flujo de energía con episodios de baja energía
Sh	Arena con laminación paralela	Arenas maduras muy finas a medias	Estratos tabulares centimétricos	Laminación horizontal paralela	Corriente acuosa de alta energía
Gh	Grava con estratificación gruesa clasto soportada	Gravas conglomeráticas	Estrato entrecruzado ubicado lateralmente de 8 m de espesor por 10 m de longitud	Estratificación difusa y gradación normal	Estructuras sedimentarias longitudinales
Gt	Grava estratificada	Gravas conglomeráticas	Estratos entrecruzados lateral y longitudinalmente con un espesor de 8m	Estratificación difusa	Colmatación de canales menores
Sr	Arenas conglomeráticas	Arenas conglomeráticas	Estratificación con laminación horizontal	Laminación paralela y de <i>ripples</i> simétricos, <i>climbing ripples</i> .	
St	Arena, fina a muy gruesa, guijarrosa	Areniscas	Estratos como hiporrelieves, espesor de capa varía de centimétrico a decimétrico	Capas con organización interna, con claras señales de bioturbación	Dunas de cresta sinuosa
Gmm	Conglomerados masivos matriz arenosa	Clastos de hasta 7 cm	Estratos masivos lenticulares; base erosiva	Masiva	Flujo de corriente de alta energía

Fuente: (Collinson y Thompson, 1982; MacEachern *et al.*, 2005; Mulder y Alexander, 2001; Nichols, 2009).

Elaboración: G. Mero y L. Villegas

Cuadro 3: Descripción e interpretación de las asociaciones de facies

Código de facies	Facies	Litología	Estratificación: morfología, límites y espesor	Estructuras sedimentarias, fósiles y otros rasgos	Interpretación (descripción del proceso)
AF-la	Asociación de facies lacustres	Arcillas blancas con intercalaciones arenosas y conglomerados	Tramos tabulares de hasta 2 m de espesor	Arcillas con presencia de bioturbación de forma dispersa, con abundantes restos vegetales	Sedimentos tranquilos depositados ocasionalmente en el medio lacustre por un corriente de baja energía.
AF-cc	Asociación de canales conglomeráticos	Conglomerados con barras de acreción lateral	Tramo con techo plano y bases erosivas y simétricas, con dimensiones de hasta 5m de espesor y 40 de anchura.	Barras arenosas lingüoides, y lechos de fondo plano asociados a altos regímenes de energía, restos óseos frecuentes.	La energía de la corriente va disminuyendo a medida que se va rellenando el canal, esto se ve reflejado por una disminución del tamaño de grano y aun aumento en la proporción de arena.
AF-cat	Asociación de canales conglomeráticos y arenosos tabulares	conglomerados y arenas con estratificación cruzada en surco	Cuerpos tabulares, con espesor hasta de 2,5 m constituido por secuencias granodecipientes de 0,5 a 0,75 m, estratos lenticulares en la base	Conglomerados masivos o con secuencias, clastos subangulosos, redondeados e imbricados	Constituyen el relleno de pequeños canales característicos de sistemas fluviales tipo <i>braided</i>
AF- p	Asociación de paleosuelos	Arenas limosas y arcillosas	Estratos tabulares desde 10cm hasta 1m de base neta ligeramente erosiva	Cantos dispersos mal clasificados con abundante matriz de limo y arcilla, restos óseos pertenecientes a venado	Tipo de depósito asociado a flujo de desbordamiento en una llanura de inundación lateralmente a un canal fluvial.
AF-afl	Asociación de areniscas de grano fino y limolitas	Arenas de grano fino y limolitas	Estratos tabulares de hasta 2m de espesor, en algunos casos en la parte superior del cuerpo los estratos se conservan como hiporrelieves.	Capas con organización interna confusa, el techo de estas facies con trazas fósiles (raíces) y fósiles animales, con bajo índice de bioturbación.	Mezcla de deposición de suspensión y de transporte, es decir con alternancia de mayor energía y otros de recisión.

Fuente: (Klingbeil *et al.*, 1999)

Elaboración: G. Mero y L. Villegas

4.2.2. Divisiones de facies piroclásticas

Para la descripción e interpretación de los depósitos piroclásticos no se utiliza el término de asociaciones de facies, sino que se utiliza el término “división” según Branney y Kokelaar (2002). Ambos términos hacen referencia a conceptos similares, el término división también representaría diferentes ambientes de depósito dentro del flujo piroclástico. En los depósitos piroclásticos estudiados en este trabajo se han reconocido 5 divisiones que se describirán a continuación. Para la denominación de las divisiones se han empleado letras mientras que para la facies se ha seguido la nomenclatura de Branney y Kokelaar (2002), para la interpretación de las facies se va utilizar el trabajo de estos mismos autores.

La descripción e interpretación de las facies piroclásticas se detallan en el cuadro 4.

División A

Descripción: La división A forma cuerpos tabulares de hasta 6 metros de potencia constituidos por cenizas medias a gruesas, lapilli y aglomerados. Las cenizas desarrollan una estratificación centimétrica a decimétrica bien definida caracterizada por una alternancia de estratos pertenecientes a diferentes facies de cenizas masivas (**facies mLT**), gradadas (**facies mLT_(g)**) y con finamente laminadas (**facies sLT**). Las cenizas en todas las facies están mal clasificadas con tamaños de grano diverso excepto la facies laminada que presenta un pequeño grado de clasificación. Los clastos son subangulosos a subredondeados. En las facies gradadas se han observado diversos tipos de gradación inversa, normal e inversa-normal. Los aglomerados están formados por clastos subangulosos a subredondeados clasto soportados. Forman estratos lenticulares de hasta 1,5 m de espesor con base y techo erosivo (**facies plensL**). Los aglomerados son masivos, aunque pueden desarrollar gradación inversa o incluso cierto ordenamiento interno con una estratificación cruzada más definida y clastos imbricados. Los estratos de cenizas y lapilli aparecen cubriendo a los estratos lenticulares de aglomerados. Esta división pasa progresivamente a la suprayacente (división B) por un aumento progresivo en el tamaño de grano y la cantidad de aglomerados (Branney y Kokelaar, 2002).

Interpretación: La facies de cenizas masivas (**facies mL**) se interpreta como sedimentación dentro del flujo piroclástico en una capa límite caracterizada por procesos de escape de fluidos. Las facies gradadas. Según Branney y Kokelaar (2002) las facies gradadas son indicativas de cambios en la competencia de la corriente, suministro de sedimento y filtrado selectivo en una capa límite dominada por escape de fluidos, resultado de continuos cambios de energía en corrientes densas piroclásticas continuas. Las gradaciones inversas y las inversas-normales pueden ser debido a la segregación de granos en una capa límite dominadas por flujo de grano que es afectada por el esfuerzo de cizalla que ejerce el flujo piroclástico superior.

Las características que presentan los estratos lenticulares de aglomerados: superficies netas y erosivas que los limitan, su tenue ordenamiento interno en algunas ocasiones y los estratos de cenizas envolviéndoles, parece indicar que estos depósitos han sido sometidos a un relativamente esfuerzo de cizalla por el flujo piroclástico (Branney y Kokelaar, 2002).

Para explicar la formación de estos cuerpos de aglomerados se ha utilizado el proceso descrito por Branney y Kokelaar (2002) en el que los clastos grandes son concentrados en la parte superior de la capa límite al sufrir una fuerte segregación, estos quedan “flotando” y son transportados en zonas más delanteras de flujos piroclásticos o zonas laterales donde hay una disminución de la energía y estos son depositados. Este mecanismo explica la presencia de clastos de gran tamaño en zonas distales y márgenes de corrientes densas piroclásticas (Fig 12). Esta asociación se interpreta como zonas delanteras de una corriente densa piroclástica, donde la energía de la corriente es elevada y ejerce un elevado esfuerzo de cizalla sobre la capa límite, aunque también está acompañada una relativa alta tasa de sedimentación.

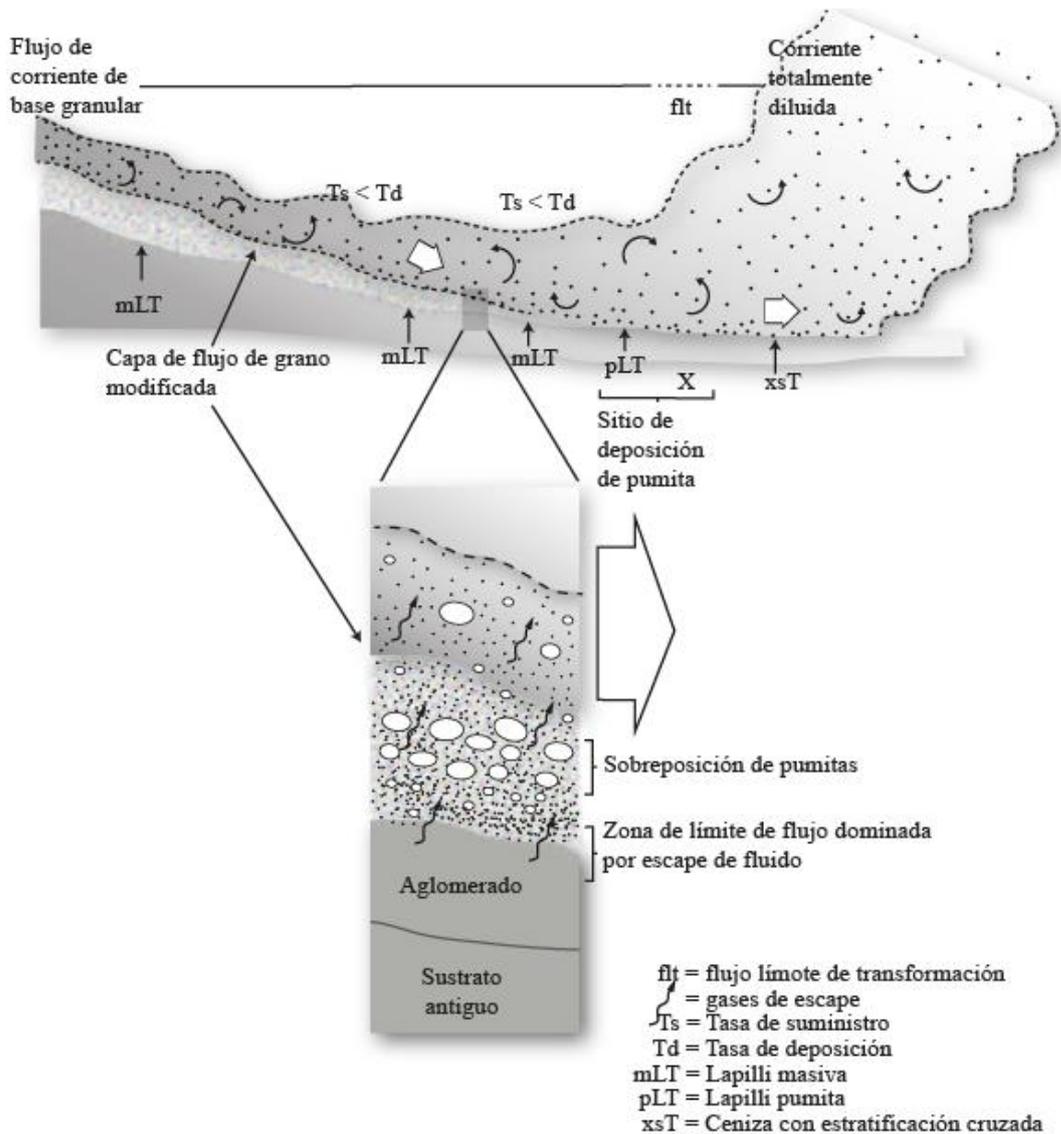


Figura 12: Esquema de facies que se encuentran en la División A
Elaboración: G. Mero y L. Villegas

División B

Descripción: La división B forma cuerpos de hasta 6 m de espesor formados por lapilli y aglomerados que lateralmente se interdigitan con las cenizas y lapilli de la división E. El lapilli forma estratos tabulares gradados siendo frecuentes las gradaciones inversas (**mLT_(g)**). Los aglomerados forman estratos tabulares con gradaciones inversas bien desarrolladas y estratos lenticulares en ocasiones de base plana y techo convexo, los estratos lenticulares se solapan unos con otros (facies **pAg_(g)**) (Fig. 13-14). Los límites frecuentemente son netos. Los depósitos

de aglomerados son clatosoportados con clastos subangulosos a subredondeados con tamaños hasta de 30 cm. Los clastos en ocasiones presentan cierto ordenamiento apareciendo imbrincados (Fig. 14). Aunque esta división presenta un aumento en el contenido de lapilli hacia arriba el paso a la división superior (división C) es brusco (Branney y Kokelaar, 2002).

Interpretación: (Branney y Kokelaar, 2002) mencionan que las facies de aglomerados (**pAg**) es interpretada como sedimentación de clastos gruesos segregados de la corriente piroclástica y debido a alta concentración de clastos son concentrados en la parte inferior del flujo. Estos depósitos en la parte inferior de la corriente están formando barras debido a la forma lenticular que presentan que pueden superponerse unas a otras. La gradación inversa es indicativa que estos clastos de pumita forman una capa límite dominada por un flujo granular, esto junto con la presencia de clastos ligeramente ordenados es indicativo que la corriente densa piroclástica tiene una elevada energía y ejerce un elevado esfuerzo de cizalla sobre la capa límite. La división se interpreta como zonas centrales de la corriente densa piroclástica donde presenta mayor energía y se concentran los clastos más gruesos.

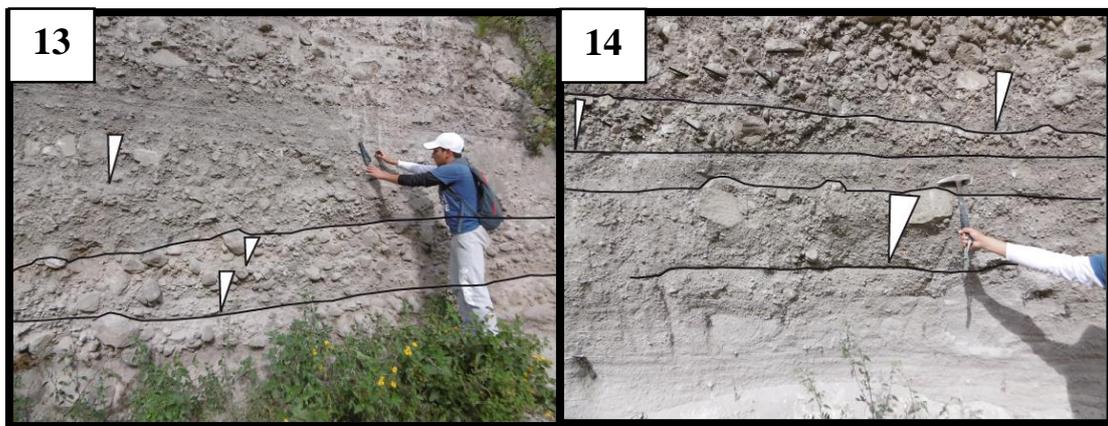


Figura 13: Facies pAg(g). Estratos tabulares y estratos lenticulares solapados unos con otros.

Figura 14: Depósitos de aglomerados clatosoportados con clastos subangulosos a subredondeados

Elaboración: G. Mero y L. Villegas.

División C

Descripción: Esta división forma unidades tabulares de hasta 3 m de potencia formada por cenizas gruesas y lapilli formando un depósito heterométrico con una estratificación difusa centimétrica a decimétrica (facies **dsLT**). Esta estratificación está definida por cambios granulométricos y gradaciones. Esta facies está intercalada con la facies de cenizas y lapilli masivas (**mLT**) siendo gradual entre ellas. Intercalado entre estas facies aparecen estratos lenticulares de aglomerados masivos mal clasificados, sin ordenamiento interno y sin límites erosivos (facies **mpAg**). Los clastos hasta de 30 cm son subredondeados a subangulosos. Entre las facies de cenizas y lapilli aparecen clastos aislados hasta de 40 cm de pumita embebidos en el sedimento (Fig. 15) (Branney y Kokelaar, 2002).

Interpretación: La facies **dsLT** se interpreta como sedimentación a partir de una corriente densa piroclástica sostenida muy variable en el tiempo en el que en la capa límite se alternan fases dominadas por escape de fluidos con otras dominadas por interacción entre granos (Branney y Kokelaar, 2002). La facies de aglomerados es interpretada por clastos gruesos segregados desde el flujo y acumulados dentro de la capa límite donde se frenan y finalmente son depositados. Al contrario que los aglomerados de la división A cuyos estratos presentaban límites netos y erosivos en esta división los estratos no presentan límites bien definidos y netos. Esto es interpretado que esta división en comparación con la A presentaba mayor tasa de sedimentación en la capa límite y de gradación, y que además el flujo piroclástico superior no ejercía un menor esfuerzo de cizalla (Branney y Kokelaar, 2002).

División D

Descripción: Esta división forma unidades de 2 m de potencia formadas por cenizas finas a medias, lapilli y aglomerados con clastos hasta de 15 cm de tamaño. Estos sedimentos se organizan en secuencias granodecrescentes tabulares hasta de 50 cm de espesor con bases erosivas (Fig. 16), sobre la superficie erosiva inferior se asientan aglomerados con secuencias granodecrescentes (facies **mgAg_(g)**) y sobre ellos aparecen el lapilli y las cenizas con laminación

paralela y cruzada bien desarrolladas (facies **xsT**). Estas secuencias finalizan con capas de ceniza muy fina de color blanco (facies **mT**) (Branney y Kokelaar, 2002).

Interpretación: Las secuencias granodecrecientes que caracterizan esta división son interpretadas como resultado de episodios de energía decreciente dentro de una corriente densa piroclástica que junto con la presencia de las superficies erosivas y las estructuras tractivas bien desarrolladas son indicadores de que en la capa límite dominaban procesos tractivos (Branney y Kokelaar, 2002). Durante la sedimentación de esta división el flujo tiene una menor concentración de partículas, pero su energía sigue siendo elevada dominando en él un mecanismo de flujo turbulento, presentes también en la capa límite. Las capas de cenizas finas que aparecen en el techo de las secuencias son interpretadas como la etapa final de baja energía dentro de estos episodios de energía decreciente dentro de una corriente densa piroclástica turbulenta sostenida e inestable.

División E

Descripción: Esta división forma litosomas tabulares de hasta 5 m de potencia que se interdigitan lateralmente con la división B. Esta división está formada principalmente por cenizas y lapilli heterométricos mal clasificados. Estos depósitos presentan estratificación centimétrica a decimétrica bien desarrollada definida por estratos masivos (**mLT**) o gradados (**mLT_(g)**) que alternan con tramos con estratificación difusa (**dsLT**). Intercalados con estos depósitos también aparecen de forma dispersa estratos masivos, lenticulares y sin límites definidos de aglomerados con clastos hasta de 30 cm (**mpAg**). Los clastos gruesos también aparecen concentrados en tramos dentro de las cenizas y lapilli formando sedimento muy heterométrico y masivo (**mLT**) (Branney y Kokelaar, 2002).

Interpretación: Según Branney y Kokelaar (2002), por el tipo de facies que constituye esta división se interpreta como resultado de la sedimentación a partir de una corriente piroclástica sostenida muy inestable con una alta tasa de sedimentación. En la capa límite alternarían mecanismos de escape de fluidos y flujo granular en función de la tasa de sedimentación dentro de la capa límite y la intensidad del esfuerzo de cizalla que ejerce corriente que pasa por encima. Esta división es escasa en aglomerados en comparación con otras divisiones. Los aglomerados

que aparecen masivos y sin límites definidos son interpretados como segregados de la corriente piroclásticas y acumulados dentro de la capa límites donde son sedimentados.

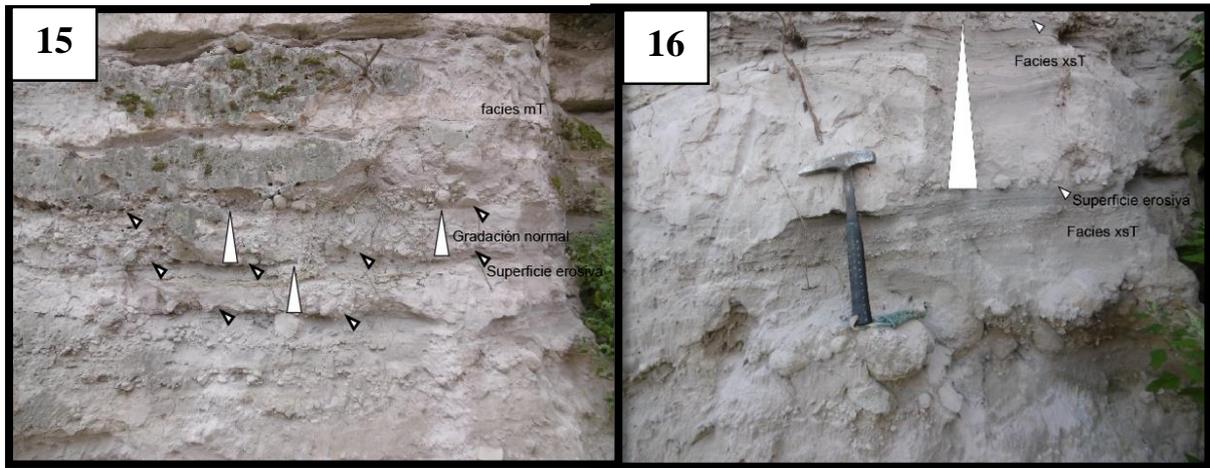


Figura 15: Facies xsT: superficie erosiva inferior se asientan aglomerados con secuencias granodecrecientes

Figura 16: Facies mt: gradación normal con base de superficie erosiva

Elaboración: G. Mero y L. Villegas

Cuadro 4: Descripción e interpretación de las facies de tipo piroclástico (Divisiones A y B).

Código de facies	Facies	Litología	Estratificación: morfología, límites y espesor	Estructuras sedimentarias, fósiles y otros rasgos	Interpretación (descripción del proceso)
mLT	Lapilli masiva	Cenizas medias a gruesas, lapilli y aglomerados	Estratificación centimétrica a decimétrica bien definida	Alternancia de estratos, con estructuras mal clasificadas	Sedimentación dentro del flujo piroclástico caracterizada por procesos de escape de fluidos
mLT _(g)	Lapilli masivas con gradación	Cenizas medias a gruesas, lapilli y aglomerados	Estratificación centimétrica a decimétrica bien definida	Alternancia de estratos, con estructuras mal clasificadas	Cambios en la competencia de la corriente, suministro de sedimento y filtrado selectivo en una capa límite dominada por escape de fluidos, resultado de continuos cambios de energía en corrientes densas piroclásticas.
sLT	Lapilli estratificada	Cenizas medias a gruesas, lapilli y aglomerados	Cuerpos tabulares, con espesor hasta de 2,5 m constituido por secuencias granodecrecientes de 0,5 a 0,75 m, estratos lenticulares en la base	Alternancia de estratos, con estructuras mal clasificadas	Segregación de granos en una capa límite dominadas por flujo de grano que es afecta por el esfuerzo de cizalla que ejerce el flujo piroclástico superior.
plensL	Lapilli lenticular con gradación inversa	Aglomerados son masivos	Estratos lenticulares de hasta 1,5 m de espesor con base y techo erosivo	Estratos lenticulares de aglomerados.	Segregación de granos en una capa límite dominadas por flujo de grano que es afecta por el esfuerzo de cizalla que ejerce el flujo piroclástico superior.
pAg _(g)	Aglomerados	Clastos soportados con clastos subangulosos a subredondeados	Estratos lenticulares que se solapan unos con otros	Estratos tabulares con gradaciones inversas bien desarrolladas y estratos lenticulares en ocasiones de base plana y techo convexo	Sedimentación de clastos gruesos segregados de la corriente piroclástica.

Fuente: (Branney y Kokelaar, 2002)

Elaboración: G. Mero y L. Villegas.

Cuadro 5: Descripción e interpretación de las facies de tipo piroclástico (Divisiones C y D).

Código de facies	Facies	Litología	Estratificación: morfología, límites y espesor	Estructuras sedimentarias, fósiles y otros rasgos	Interpretación (descripción del proceso)
dsLT	Lapilli con estratificación difusa	Cenizas gruesas y lapilli	Estratificación difusa centimétrica a decimétrica	Forman un depósito heterométrico	Sedimentación a partir de una corriente densa piroclástica sostenida muy variable en el tiempo en el que en la capa límite se alternan
mLT	Lapilli masiva	Cenizas medias a gruesas, lapilli y aglomerados	Estratificación centimétrica a decimétrica bien definida	Alternancia de estratos, con estructuras mal clasificadas	Sedimentación dentro del flujo piroclástico caracterizada por procesos de escape de fluidos
mpAg	Aglomerado	Aglomerados	Estratos lenticulares	Estratos lenticulares de aglomerados masivos mal clasificados, sin ordenamiento interno y sin límites erosivos	Clastos gruesos segregados desde el flujo y acumulados dentro de la capa límite donde se frenan y finalmente son depositados.
mgAg _(g)	Aglomerados con secuencias granodecrecientes	Aglomerados con secuencias granodecrecientes	Secuencias granodecrecientes tabulares hasta de 50 cm de espesor con bases erosivas	Estratos lenticulares de aglomerados masivos mal clasificados, sin ordenamiento interno y sin límites erosivos	Estas secuencias granodecrecientes son interpretadas como resultado episodios de energía decreciente dentro de una corriente densa piroclástica
xsT	Lapilli y cenizas	Lapilli y cenizas	Secuencias granodecrecientes tabulares hasta de 50 cm de espesor con bases erosivas	Lapilli y cenizas con laminación paralela y cruzada bien desarrolladas	Interpretadas como resultado episodios de energía decreciente dentro de una corriente densa piroclástica

Fuente: (Branney y Kokelaar, 2002)

Elaboración: G. Mero y L. Villegas.

Cuadro 6: Descripción e interpretación de las facies de tipo piroclástico (División E).

Código de facies	Facies	Litología	Estratificación: morfología, límites y espesor	Estructuras sedimentarias, fósiles y otros rasgos	Interpretación (descripción del proceso)
mLT	Lapilli masiva	Cenizas medias a gruesas, lapilli y aglomerados	Estratificación centimétrica a decimétrica bien definida	Alternancia de estratos, con estructuras mal clasificadas	Sedimentación dentro del flujo piroclástico caracterizada por procesos de escape de fluidos
mLT _(g)	Lapilli masivas con gradación	Cenizas medias a gruesas, lapilli y aglomerados	Estratificación centimétrica a decimétrica bien definida	Alternancia de estratos, con estructuras mal clasificadas	Cambios en la competencia de la corriente, suministro de sedimento y filtrado selectivo en una capa límite dominada por escape de fluidos, resultado de continuos cambios de energía en corrientes densas piroclásticas.
dsLT	Lapilli con estratificación difusa	Cenizas gruesas y lapilli	Estratificación difusa centimétrica a decimétrica	Forman un depósito heterométrico	Sedimentación a partir de una corriente densa piroclástica sostenida muy variable en el tiempo en el que en la capa límite se alternan
mpAg	Aglomerado	Aglomerados	Estratos lenticulares	Estratos lenticulares de aglomerados masivos mal clasificados, sin ordenamiento interno y sin límites erosivos	Clastos gruesos segregados desde el flujo y acumulados dentro de la capa límite donde se frenan y finalmente son depositados.
mLT	Lapilli masiva	Cenizas medias a gruesas, lapilli y aglomerados	Estratificación centimétrica a decimétrica bien definida	Alternancia de estratos, con estructuras mal clasificadas	Sedimentación dentro del flujo piroclástico caracterizada por procesos de escape de fluidos

Fuente: (Branney y Kokelaar, 2002)

Elaboración: G. Mero y L. Villegas.

4.2.3. Arquitectura estratigráfica

A continuación, se describe e interpretan la arquitectura estratigráfica de los flujos piroclásticos y fluviales, identificados en la sucesión estratigráfica.

Arquitectura estratigráfica de los flujos piroclásticos

Los depósitos piroclásticos se encuentran dentro de la unidad III (Fig. 4), 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 (Fig. 17). 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).

En la unidad de flujo 2 se han diferenciado 6 divisiones cada una de ellas constituida por dos o más facies y que representarían diferentes regiones de una corriente piroclástica (Fig. 17). Estas divisiones son nombradas utilizando letras. La división A, situada en la parte inferior, está constituida por cenizas medias a gruesas, lapilli y aglomerados. Las cenizas presentan una estratificación centimétrica a decimétrica, con estratos masivos y gradados alternando con otros con una fina laminación. Los aglomerados son clasto-soportados formando estratos lenticulares frecuentemente con base y techo neto erosivo.

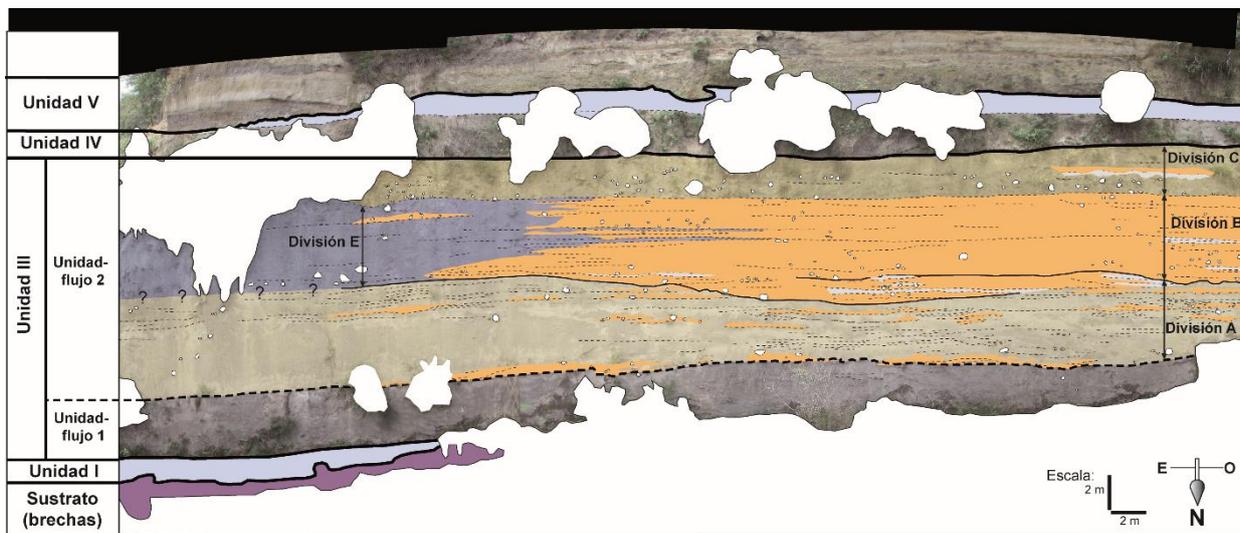


Figura 17: Panel fotográfico en el afloramiento de la terraza en la sección 3. En él se han identificado algunas de las unidades estratigráficas descritas y se ha interpretado los depósitos piroclásticos de la Unidad III.

Elaboración: G. Mero y L. Villegas

Estos aglomerados son masivos, o bien presentan gradación inversa o incluso cierto ordenamiento interno con estratificación y clastos imbricados. La división A evoluciona gradualmente a la división B mediante un aumento en el tamaño de grano del sedimento y las

intercalaciones de aglomerados. Esta división está formada principalmente por aglomerados y lapilli en estratos decimétricos hasta de 1 m de espesor tabulares con gradaciones inversas bien desarrolladas, estos presentan límites netos. La división B también evoluciona progresivamente hacia techo a la división C. Esta división está constituida por cenizas gruesas y lapilli en estratos tabulares centimétricos a decimétricos masivos o con gradaciones y presentan intercalaciones de aglomerados en estratos tabulares y lenticulares decimétricos con límites no bien definidos.

Al contrario a como ocurre en la división A en esta división los estratos de cenizas circundante no se adaptan a los estratos de aglomerados, sino, que estos están embebidos en las cenizas. La división C muestra una disminución progresiva en el tamaño de la ceniza acompañado con el desarrollo de facies con laminación fina. La unidad de flujo 2 finaliza hacia el techo con la división D caracterizada por la presencia de secuencias granodecrecientes con bases erosivas bien desarrolladas con aglomerados, cenizas medias a finas con laminación paralela y cruzada y estratos de cenizas tamaño limo a arcilla de color blanco.

La división B lateralmente se interdigita con la división E, formada por ceniza media a gruesa con una estratificación bien desarrollada centimétrica a decimétrica definida por estratos masivos y gradados con intercalaciones centimétricas de aglomerados discontinuos tabulares sin límites definidos. En las secciones 1 y 2, hacia donde hay una disminución de espesor del depósito, se ha definido otra división denominada F. Esta división está formada principalmente por estratos lenticulares de aglomerados clastos-soportados decimétricos que pasan hacia arriba y lateralmente a un sedimento mal clasificado de lapilli y cenizas gruesas con una estratificación centimétrica bien desarrollada. Intercalados también aparecen estratos discontinuos de cenizas medias a gruesas con laminación, estratificadas o masivas.

La unidad de flujo 2 se interpreta como un flujo piroclástico en el que podemos diferenciar dos etapas durante su desarrollo, una inferior de energía creciente (*waxing flow*) representada por las divisiones A y B durante la que dominarían procesos de fluidificación e interacción de granos en la zona límite de flujo. Esta etapa sería el resultado de un proceso de progradación de un flujo piroclástico caracterizado por el transporte de aglomerados y brechas en su parte central. A esta etapa le habría seguido otra de energía decreciente (*waning flow*) representada por la división C, caracterizada por un aumento de la sedimentación y una disminución de la

cizalla ejercida por el paso del flujo, con una zona límite de flujo también dominada por la fluidificación e interacción de los granos. La etapa final D muestra rasgos propios de flujos turbulentos como secuencias granodrecientes, bases erosivas, estructuras de flujo y capas de cenizas muy finas (*ash cloud*). Las divisiones E y F representan zonas marginales de la corriente piroclástica cuyo *thalweg* estaría representado por la división B (Branney y Kokelaar, 2002; Druitt, 1998; Sulpizio et al., 2014).

Arquitectura estratigráfica de los depósitos fluviales

La unidad V está constituida por una sucesión fluvial caracterizada por canales conglomeráticos embebidos en materiales de grano más fino (Fig. 18). 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 (Fig. 18). 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 ocre 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).

Los sistemas fluviales propios asociados a esta granulometría gruesa son los de tipo *braided*. Sin embargo, existen algunos factores que favorecen la formación de un sistema anastomosado con esta granulometría, como son: la elevada cohesión de los sedimentos de la llanura de inundación, grandes variaciones en los caudales y una tasa de sedimentación elevada dentro del canal asociada a una disminución en la pendiente del mismo.

El sistema fluvial en estudio se interpreta como un sistema anastomosado, ya que presenta una elevada cohesión de los sedimentos de la llanura de inundación, dejando rastros de acreción lateral y dando origen a las diferentes facies tipo G (Grava). Además, presenta grandes variaciones en los caudales debido a los factores climáticos y tectónicos. La disminución en la pendiente del canal produce una alta tasa de sedimentación.

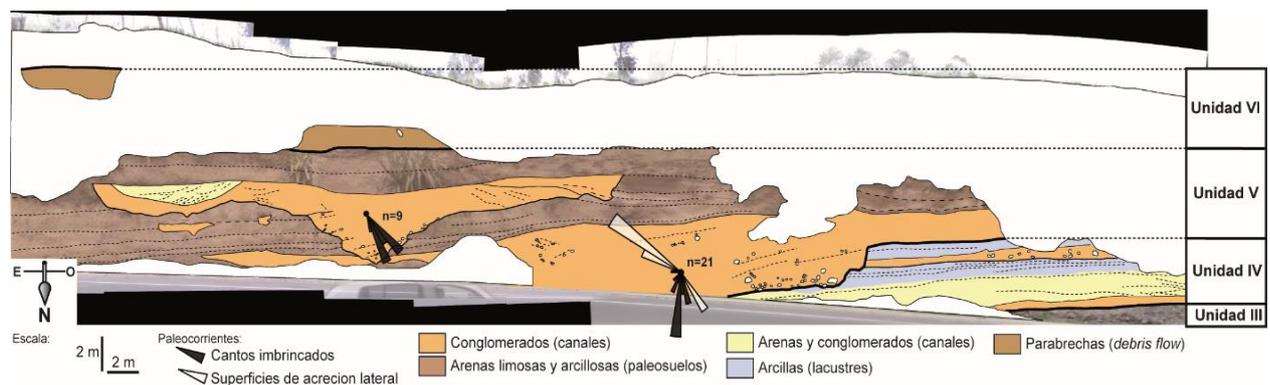


Figura 18: Interpretación del panel fotográfico realizado en los afloramientos de la sección 1, donde se identificaron algunas de las unidades estratigráficas, así como la arquitectura fluvial de la unidad V.

Elaboración: G. Mero y L. Villegas

Según Miall (1977), los sistemas de ríos anastomosados desarrollan un sistema de canales de alta sinuosidad de forma permanente y estable, asemejándose al de los ríos meándricos. Este sistema fluvial presenta una pendiente baja a muy baja, en la cual se enlazan varios canales altamente sinuosos, medianamente profundos, estrechos y separados por planicies de inundación. (Fig. 19).

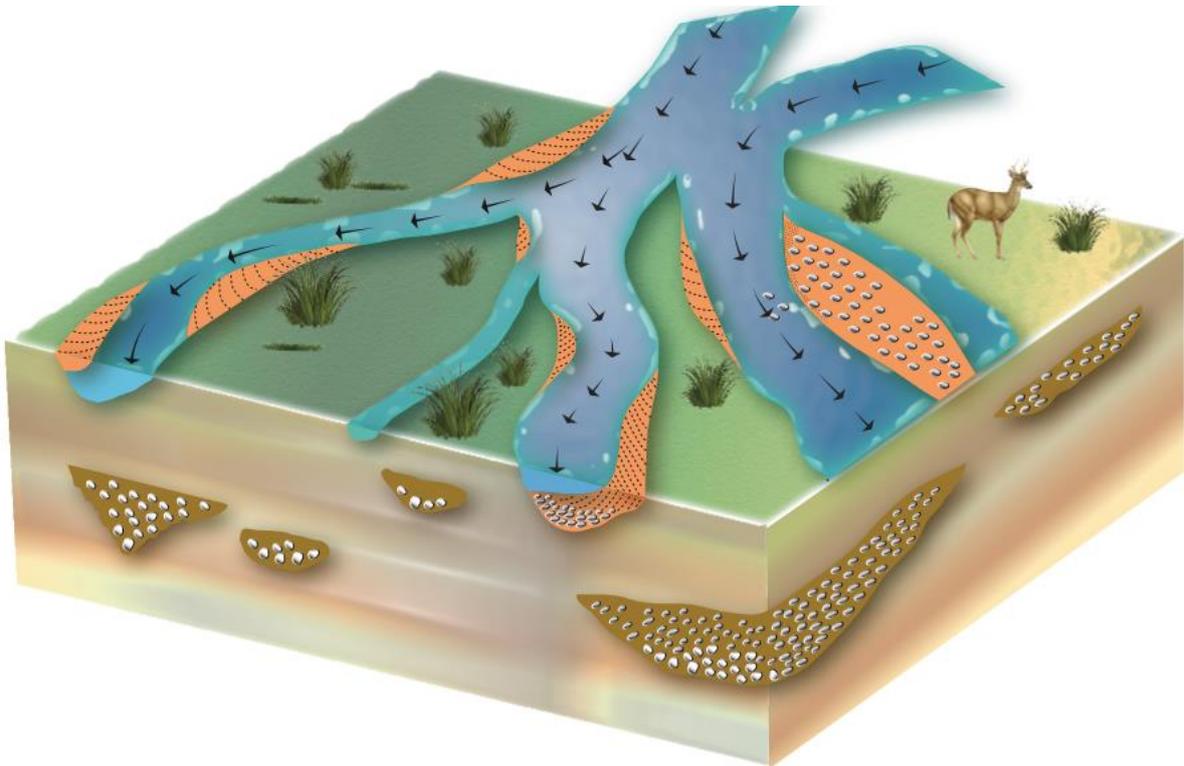


Figura 19: Representación paleo ambiental del sistema fluvial en estudio
Elaboración: G. Mero y L. Villegas

4.2.4. Relación de hidrofacies con litofacies

Apoyados 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) (ver Anexo 3). En este trabajo se constituyeron 4 hidrofacies a partir de 14 litofacies (Cuadro 7). 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 (Fig 20).

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

Cuadro 7: 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
Flm	OW	Poco permeable

Fuente: (Klingbeil *et al.*, 1999)

Elaboración: G. Mero y L. Villegas.

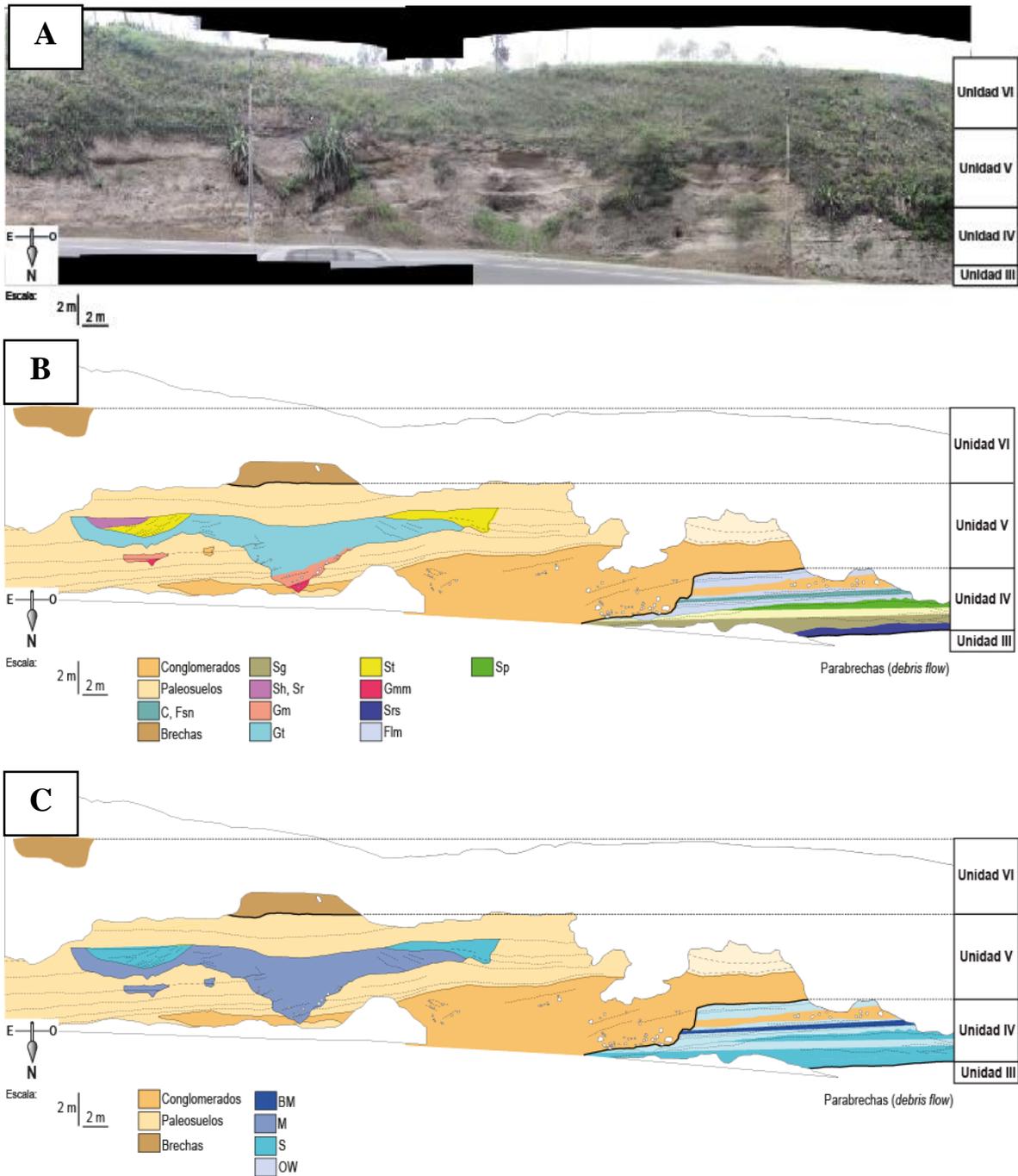


Figura 20: Correlación de hidrofacies A. Fotografía del afloramiento; B. Interpretación sedimentológica.

Elaboración: G. Mero y L. Villegas

4.3. Características hidrogeológicas del depósito

Se establece el análisis de los movimientos de aguas subterráneas de acuerdo a las formaciones seleccionadas por su interés hidrogeológico, teniendo en cuenta su porosidad, permeabilidad y capacidad de almacenamiento (Fig. 21).

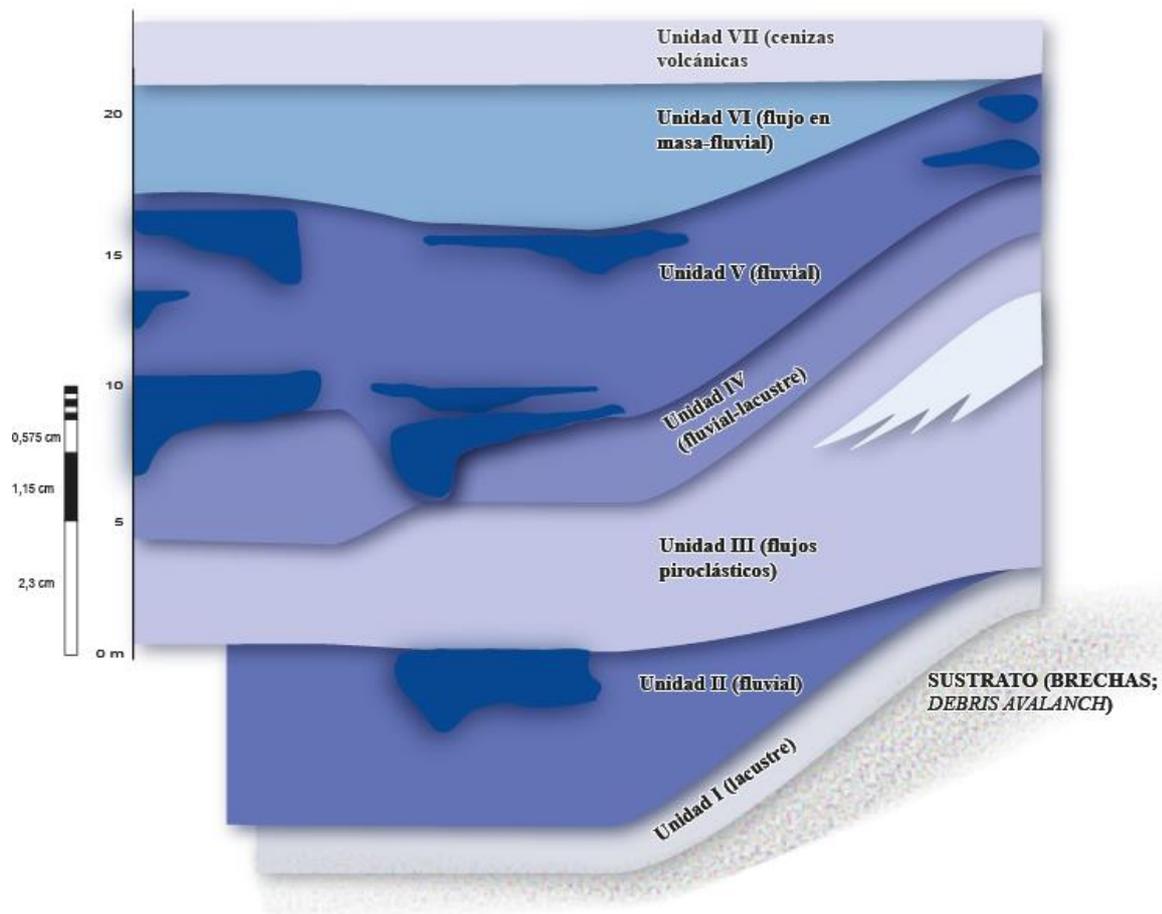


Figura 21: Características hidrogeológicas
Elaboración: G. Mero y L. Villegas

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y recomendaciones

A continuación, se presenta las conclusiones del trabajo realizado, así también se expone ciertas recomendaciones.

5.1. 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.

5.2. Recomendaciones

- Continuar con este trabajo geológico acerca de terrazas fluviales en el cauce del río Tahuando, para tener una mejor comprensión del relleno de estos depósitos fluviales, enfatizando los datos de sedimentología y estratigrafía.
- Considerar los datos obtenidos en este estudio como referente para realizar planes de gestión de aguas subterráneas dentro de la ciudad de Ibarra.
- Enfatizar en los estudios de depósitos de origen piroclástico, puesto que la información que existe de estos es escasa dentro de la terraza fluvial del río Tahuando.

REFERENCIAS

- Al-Ajmi, H., Hinderer, M., Keller, M., Rausch, R., Blum, P., & Bohnsack, D. (2011). The role of outcrop analogue studies for the characterization of aquifer properties. *International Journal of Water Resources and Arid Environments*, 1(1), 48-54.
- 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., Aigner, T., 1997. Aquifer architecture analysis using ground-penetrating radar: Triassic and Quaternary examples (S. Germany). *Environ. Geol.* 31, 66–75. Bear, J., 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York, NY.
- 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.
- Bolivar Nuñez (2005): Estudio hidrogeológico del acuífero de Ibarra. EMAPA. In edito.
- Brice, J. (1964). Channel Patterns and Terraces of the Loup Rivers in Nebraska. *United States Geological Survey Professional Paper*.

- Branney, M., & Kokelaar, P. (2002). *Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites*. Geological Society. London, memoirs, vol 27, 143 pp.
- Constitución de la República del Ecuador (2008). *Registro Oficial*, 449 (20 de Octubre de 2008).
- Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización COOTAD (2011). Ecuador – Quito
- Collinson, J y Thompson, D. (1989), *Sedimentary structures*, 2nd ed.: Chapman and Hall, London, 207 p.
- Coussot, P y Meunier, M. (1996), Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40, 209-227.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Omega.
- Barberi F., Coltelli M., Ferrara G., Innocenti F., Navarro J., Santacrocce R. 1988, Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geol. Mag.* 125/1, pp. 1-1
- Brice, J. (1964). Channel Patterns and Terraces of the Loup Rivers in Nebraska. United States Geological Survey Professional Paper.
- Druitt, T. (1998). Pyroclastic density currents. *Geological Society, London, Special Publications*, 145 (1), 145-182.
- 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.
- EMAPA-I. (2017). *Volumen de captación de agua potable para la ciudad*. Ibarra.

- 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. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0895-9811\(92\)90004-i](http://dx.doi.org/10.1016/0895-9811(92)90004-i)
- Fraser, G y Cobb, J. (1982). Late Wisconsin proglacial sedimentation along the West Chicago Moraine of northeastern Illinois. *J. Sediment. Petrol.* 52 (2), 473–491.
- Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Ibarra GAD-I. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Ibarra: 2012-2031*.
- Gutiérrez, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Hall, J; Samaniego, M; Le Pennec y Jhonson, J. (2008). Recent and active volcanism in the Ecuadorian Andes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 1-6.
- Harden, C. (2004). Terrace River. *Encyclopedia of Geomorphology*. Routhledge. London.
- Hess, K. (1990). Spatial structure in a glacial outwash, sand and gravel aquifer, Cape Cod, Massachusetts, 17, 509.
- Hess, K., Wolf, S., Celia, M. (1991). Estimation of Hydraulic Conductivity in a Sand and Gravel Aquifer. *USGS Water resources investigation report*, 15–22.
- Huggenberger, P y Aigner, T. (1999). Introduction to the special issue on aquifer-sedimentology: problems, perspectives and modern approaches, *Sedimentary Geology*, 129, 179-186.
- 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.

- INAMHI, (2015). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador* (pp. 8-118). Quito: Grupo de Aguas Subterráneas de la Unidad de Estudios e Investigaciones Hidrológicas de la Dirección de Gestión de Hidrología del Inamhi.
- Jussel, P. (1992). Modellierung des Transports gelöster 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 Tübingen.
- 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.
- Medina, P. (2016). *Modelo Geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de Mexico*. (Tesis de posgrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, Mexico.
- 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*. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-03237-4>
- 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-

- 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.
- Petroigne. (2017). *Tipos de rocas piroclásticas*. Recuperado de: <https://petroigne.files.wordpress.com/2013/07/pirocl3a1sticas1.jpg>
- 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.
- Rojas, D y Paredes, J. (2013). *Compendio de Geología General*. Lima, Perú: Editora Macro EIRL.
- Schumm, S.A. (1977): *The Fluvial System*. Wiley. New York.
- Schumm, S.A. (1963). Sinuosity of alluvial rivers of the Great Plains. *Bulletin of the Geological Society of America*, 74, 1089-1100.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo SENPLADES. (2013). *Objetivos Estratégicos del Plan Nacional del Buen Vivir: 2013-2017*.
- Sudicky, E. (1986). A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer: spatial variability of hydraulic conductivity and its role in the dispersion process. *Water Resour.* 22 (13), 2069–2082.
- Sulpizio, R., Dellino, P., Doronzo, M y Sarocchi, D. (2014). Pyroclastic density currents: state of the art and perspectives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 283, 36-65.
- 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.
- United Nations Organization for Education, Science and Culture UNESCO. (2015). Water For a Sustainable World. *The United Nations World Water Development Report 2015*.
- 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., McNamara L., Frechette 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>

ANEXOS