



Universidad de Guayaquil

**UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
GRADO ACADÉMICO DE INGENIERA GEÓLOGA**

**EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AGUA
SUBTERRÁNEA EN LA MICROCUENCA ZARUMA URCU.**

AUTOR: KAREN FABIOLA VILLACÍS MALDONADO

TUTOR: ING. CÉSAR PATRICIO BORJA BERNAL. Ms.C

GUAYAQUIL, JUNIO, 2020



Universidad de Guayaquil

**UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
GRADO ACADÉMICO DE INGENIERA GEÓLOGA**

TEMA:

EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA
EN LA MICROCUENCA ZARUMA URCU.

AUTOR: KAREN FABIOLA VILLACÍS MALDONADO

TUTOR: ING. CÉSAR PATRICIO BORJA BERNAL. MSc

GUAYAQUIL, JUNIO, 2020

ANEXO VI. - CERTIFICADO DEL DOCENTE TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD CIENCIAS NATURALES
CARRERA INGENIERÍA GEOLÓGICA



UNIDAD DE TITULACIÓN

Guayaquil, 06 de marzo del 2020

Señor

Lcdo. Félix Sanango Pazmiño, M.A.E.
VICEDECANO (E) DE LA FACULTAD CIENCIAS NATURALES
UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
Ciudad. -

De mis consideraciones:

Envío a Ud. el Informe correspondiente a la tutoría realizada al Trabajo de Titulación **EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA MICROCUENCA ZARUMA URCU.**, del estudiante **KAREN FABIOLA VILLACÍS MALDONADO**, indicando que ha (n) cumplido con todos los parámetros establecidos en la normativa vigente:

- *El trabajo es el resultado de una investigación.*
- *El estudiante demuestra conocimiento profesional integral.*
- *El trabajo presenta una propuesta en el área de conocimiento.*
- *El nivel de argumentación es coherente con el campo de conocimiento.*

Adicionalmente, se adjunta el certificado de porcentaje de similitud y la valoración del Trabajo de Titulación con la respectiva calificación.

Dando por concluida esta tutoría de Trabajo de Titulación, **CERTIFICO**, para los fines pertinentes, que la estudiante está apta para continuar con el proceso de revisión final.

Atentamente,

César Patricio Borja Bernal Ms.C
C.I. 0601605918

Tutor de Trabajo de Titulación
C.I.: 0920218989

C.C: Gestora de Integración Curricular y Seguimiento a Graduados

ANEXO VII.- CERTIFICADO PORCENTAJE DE SIMILITUD



**UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD CIENCIAS NATURALES
CARRERA INGENIERÍA GEOLÓGICA
UNIDAD DE TITULACIÓN**



Habiendo sido nombrado Ing. César Patricio Borja Bernal Ms.C, tutor del Trabajo de Titulación certifico que el presente Trabajo de Titulación ha sido elaborado por Karen Fabiola Villacís Maldonado, con mi respectiva supervisión como requerimiento parcial para la obtención del título de INGENIERA GEÓLOGA.

Se informa que el trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA MICROCUENCA ZARUMA URCU**, ha sido orientado durante todo el periodo de ejecución en el programa antiplagio URKUND quedando el 5 % de coincidencia.

URKUND

Urkund Analysis Result

Analysed Document: KAREN VILLACIS MALDONADO.docx (D64887817)
Submitted: 3/5/2020 1:02:00 PM
Submitted By: geologoborja@gmail.com
Significance: 5 %

Sources included in the report:

urkund.docx (D48512094)
CIRO HUAMAN YUTO.pdf (D63172890)
<https://docplayer.es/57017609-Universidad-de-costa-rica.html>

Instances where selected sources appear:

15

César Patricio Borja Bernal Ms.C
C.I. 0601605918

TUTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN
FECHA: 06/03/2020



ANEXO VIII.- INFORME DEL DOCENTE REVISOR
UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD CIENCIAS NATURALES
CARRERA INGENIERÍA GEOLÓGICA
UNIDAD DE TITULACIÓN



Guayaquil, 3 de abril de 2020
Señor Licenciado
Félix Sanango Pazmiño, MAE.
VICEDECANO (E) DE FACULTAD
FACULTAD CIENCIAS NATURALES
UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL

De mi consideración:

Envío a Ud. el Informe correspondiente a la **REVISIÓN FINAL** del Trabajo de Titulación **EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA MICROCUENCA ZARUMA URCU**, de la estudiante Karen Fabiola Villacís Maldonado. Las gestiones realizadas me permiten indicar que el trabajo fue revisado considerando todos los parámetros establecidos en las normativas vigentes, en el cumplimiento de los siguientes aspectos:

Cumplimiento de requisitos de forma:

- El título tiene un máximo de 14 palabras.
- La memoria escrita se ajusta a la estructura establecida.
- El documento se ajusta a las normas de escritura científica seleccionadas por la Facultad.
- La investigación es pertinente con la línea y sublíneas de investigación de la carrera.
- Los soportes teóricos son de máximo 10 años.
- La propuesta presentada es pertinente.

Cumplimiento con el Reglamento de Régimen Académico:

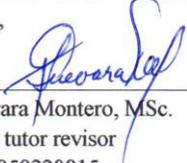
- El trabajo es el resultado de una investigación.
- El estudiante demuestra conocimiento profesional integral.
- El trabajo presenta una propuesta en el área de conocimiento.
- El nivel de argumentación es coherente con el campo de conocimiento.

Adicionalmente, se indica que fue revisado, el certificado de porcentaje de similitud, la valoración del tutor, así como de las páginas preliminares solicitadas, lo cual indica el que el trabajo de investigación cumple con los requisitos exigidos.

Una vez concluida esta revisión, considero que la estudiante está apta para continuar el proceso de titulación.

Particular que comunicamos a usted para los fines pertinentes.

Atentamente,


Tania Guevara Montero, MSc.
Docente tutor revisor
C.I. 0959220815

C.C: Gestora de Integración Curricular y Seguimiento a Graduados

ANEXO XI.- FICHA DE REGISTRO DE TRABAJO DE TITULACIÓN



UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD CIENCIAS NATURALES
CARRERA INGENIERÍA GEOLÓGICA



UNIDAD DE TITULACIÓN

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE GRADUACIÓN		
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA MICROCUENCA ZARUMA URCU.	
AUTOR(ES) (apellidos/nombres):	Villacis Maldonado Karen Fabiola	
REVISOR(ES)/TUTOR(ES) (apellidos/nombres):	Ing. Cesar Patricio Borja Bernal. Msc Ing. Tania Guevara Montero Msc.	
INSTITUCIÓN:	Universidad de Guayaquil	
UNIDAD/FACULTAD:	Facultad Ciencias Naturales	
MAESTRÍA/ESPECIALIDAD:	Ingeniería Geológica	
GRADO OBTENIDO:	Ingeniera Geóloga	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	ABRIL	No. DE PÁGINAS: 117
ÁREAS TEMÁTICAS:	Ciencias Geológicas	
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Análisis multicriterio, agua subterránea, hidrogeología, variables.	
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):		
<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>		

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo realizar una zonificación de áreas con un alto potencial hidrogeológico en la microcuenca Honda, ubicada en el cantón Zaruma. Se ejecutaron 4 etapas de trabajo, iniciando con la recopilación de información bibliográfica y el uso de sistemas de información geográfica, seguido de una etapa de campo en la que se realizaron ensayos de infiltración, reconocimiento geológico, topográfico y muestreo de suelo, datos necesarios para el modelo digital deseado, posteriormente se ejecutaron ensayos de laboratorio para los análisis respectivos de cada muestra (humedad natural, textura y secciones delgadas de rocas) y se finalizó con el procesamiento de los datos. Una vez culminadas estas etapas se generaron capas de información digital para la aplicación de la evaluación multicriterio, mediante procesos de análisis jerárquicos y superposición de datos de los factores litología, velocidad de infiltración, precipitación, textura de suelo, uso de suelo, densidad de drenaje y pendientes, obteniendo como resultado la distribución espacial y zonificación del área, de la cual 9,29 Km², un 47,11% de territorio, tiene aptitud de Excelente a Buena para para la prospección de agua subterránea, culminando la etapa inicial de prospección.

ABSTRACT

The thesis has been carried out with the main objective of applying a methodology that allows discovering the areas with probability of groundwater, using geo-statistics, using a Saaty matrix, which will rank the variables that influence the accumulation of this resource. The multicriteria analysis method was applied using GIS (Geographic Information System), through which the evaluation and analysis of the selected variables is performed (lithology, slopes, precipitation, drainage density, soil texture, infiltration and land use) that have the greatest influence on the study, to later give them a weighted value, which is recalculated through the method called Weighted Linear Combination and after this, superimpose layers, resulting in a map with the hydrogeological potential. The Zaruma Urcu micro-basin, with an extension of 5.18km², was zoned with 4 ranges based on the calculation of the Groundwater Potential Index (GWPI): Bad, Fair, Good and Excellent, resulting in areas with good possibilities of housing or store groundwater in 44.56% of the territory.

ADJUNTO PDF:

SI

NO

CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593996795855	E-mail: karen.villacism@ug.edu,ec
	CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	
	Nombre: Facultad de Ciencias Naturales	
	Teléfono: (04) 308-0777	
	E-mail: info@fccnnugye.com	

ANEXO XII - DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y DE AUTORIZACIÓN DE LICENCIA GRATUITA INTRANSFERIBLE Y NO EXCLUSIVA PARA EL USO NO COMERCIAL DE LA OBRA CON FINES ACADÉMICAS



UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD CIENCIAS NATURALES
CARRERA INGENIERÍA GEOLÓGICA



UNIDAD DE TITULACIÓN

LICENCIA GRATUITA INTRANSFERIBLE Y NO COMERCIAL DE LA OBRA CON FINES ACADÉMICOS

Yo, Villacís Maldonado Karen Fabiola, con C.I. No. 2400055832, certifico que los contenidos desarrollados en este Trabajo de Titulación, cuyo título es **EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA MICROCUENCA ZARUMA URCU**, son de mi absoluta propiedad y responsabilidad Y SEGÚN EL Art. 114 del ***CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN***, autorizo la utilización de una licencia gratuita intransferible, para el uso no comercial de la presente obra a favor de la Universidad de Guayaquil.

Villacís Maldonado Karen Fabiola
C.I.: 2400055832

***CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN (Registro Oficial n. 899 - Dic./2016) Artículo 114.-** De los titulares de derechos de obras creadas en las instituciones de educación superior y centros educativos.- En el caso de las obras creadas en centros educativos, universidades, escuelas politécnicas, institutos superiores técnicos, tecnológicos, pedagógicos, de artes y los conservatorios superiores, e institutos públicos de investigación como resultado de su actividad académica o de investigación tales como trabajos de titulación, proyectos de investigación o innovación, artículos académicos, u otros análogos, sin perjuicio de que pueda existir relación de dependencia, la titularidad de los derechos patrimoniales corresponderá a los autores. Sin embargo, el establecimiento tendrá una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra con fines académicos.



UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD CIENCIAS NATURALES
CARRERA INGENIERÍA GEOLÓGICA



UNIDAD DE TITULACIÓN

EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA MICROCUENCA ZARUMA URCU.

Autor: Karen Fabiola Villacís Maldonado

Tutor: ING. César Patricio Borja Bernal. Ms.C

RESUMEN

La tesis se ha realizado con el objetivo principal de aplicar una metodología que permita descubrir las zonas con probabilidad de agua subterránea, utilizando geo-estadística, mediante una matriz de Saaty, la cual jerarquizará las variables que influyen en la acumulación de este recurso. Se aplicó el método del análisis multicriterio usando GIS (Sistema de Información Geográfica por sus siglas en inglés), mediante el cual se realiza la evaluación y análisis de las variables seleccionadas (litología, pendientes, precipitación, densidad de drenaje, textura del suelo, infiltración y uso de suelo) que mayor influencia tienen en el estudio, para luego darles un valor ponderado, el cual es recalculado a través del método denominado Combinación Lineal Ponderada y posterior a esto, realizar la superposición de capas, dando como resultado un mapa con el potencial hidrogeológico. La microcuenca Zaruma Urcu, con una extensión de 5.18km², fue zonificada con 4 rangos a partir del cálculo de Índice de Potencial de Agua Subterránea (GWPI): Malo, Regular, Bueno y Excelente, dando como resultado zonas con buenas posibilidades de albergar o almacenar agua subterránea en un 44,56% del territorio.

Palabras clave: Análisis multicriterio, agua subterránea, hidrogeología, variables.



**UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL
FACULTAD CIENCIAS NATURALES
CARRERA INGENIERÍA GEOLÓGICA**



UNIDAD DE TITULACIÓN

Evaluation of the probability of occurrence of groundwater, in the Zaruma Urcu microbasin.

Author: Villacís Maldonado Karen Fabiola

Advisor: Ing. Cesar Patricio Borja Bernal. Ms.C

Abstract

The thesis has been carried out with the main objective of applying a methodology that allows discovering the areas with probability of groundwater, using geo-statistics, using a Saaty matrix, which will rank the variables that influence the accumulation of this resource. The multicriteria analysis method was applied using GIS (Geographic Information System), through which the evaluation and analysis of the selected variables is performed (lithology, slopes, precipitation, drainage density, soil texture, infiltration and land use) that have the greatest influence on the study, to later give them a weighted value, which is recalculated through the method called Weighted Linear Combination and after this, superimpose layers, resulting in a map with the hydrogeological potential. The Zaruma Urcu micro-basin, with an extension of 5.18km², was zoned with 4 ranges based on the calculation of the Groundwater Potential Index (GWPI): Bad, Fair, Good and Excellent, resulting in areas with good possibilities of housing or store groundwater in 44.56% of the territory.

Key Words: Multicriterio analysis, groundwater, hydrogeology, variables

Dedicatoria.

A Dios por darme salud y bendiciones en cada paso de mi vida.

A mis padres, María Esther y Freddy Diógenes, por estar siempre a mi lado guiándome y forjándome como ser humano, por enseñarme a nunca rendirme ante la adversidad y por darme la mejor herencia; la educación.

A mi hermano, Freddy Leonardo, mi compañero de vida y aventuras.

A mi amada Tía Blanquita, quien siempre me dio valor y ánimos en cada etapa de mi vida estudiantil y personal, por enseñarme a amar a pesar de la distancia. Un beso al cielo.

A mis abuelitos, Luzmila, quien es mi compañera, la que me brinda su amor, ternura y donde sea que yo este me envía sus bendiciones.

Guillermo, mi Papi Gemo amado, quien me acompañó toda mi vida y etapa de estudiante y me alentó con su amor y sus palabras a seguir triunfando, hoy mi corazón esta con él en el cielo y decir que la casa sin su compañía no es igual. Julia, quien siempre me brindó su amor inmenso y me dio todos los besos que un nieto necesita, hoy desde el cielo, me abrazas y me guías. Diógenes, mi abuelito, el de las historias bellas de su arduo trabajo, mi corazón te extraña, desde el cielo me cuidas y me abrazas.

Anhelo seguir viéndolos a través de mis sueños para poder contarles en lo que me estoy convirtiendo, en lo que ustedes siempre desearon.

Y a cada integrante de mi hermosa familia, en especial a mi Tía Bertha, por cada mensaje y apoyo continuo a lo largo de toda mi vida.

A José Manuel, por apoyarme, por crecer tanto profesional como personalmente a mi lado y superar cada obstáculo presente.

Agradecimientos

A la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Naturales, por abrirme las puertas y brindarme educación de calidad, junto a excelentes docentes.

A mi tutor el Ing. Patricio Borja Bernal, por ser amigo, docente y un excelente tutor, por dedicarme tiempo y ayudarme en el término de mi carrera profesional.

Un agradecimiento especial a la Ing. Tania Guevara por enseñarme con su experiencia a través de sus clases esta hermosa profesión: Geología, gracias por brindarme su amistad, al igual que el Ing. Jorge Alonso, docentes que siempre llevaré en mi corazón.

Al Ing. Erwin Larreta por brindarme su amistad, consejos y ayudarme en cada duda que se me presentaba en el camino.

Contenido

CAPÍTULO I	2
Introducción.....	2
Antecedentes	4
Objetivos.....	6
Objetivo General	6
Objetivos Específicos.....	6
Área de estudio	7
Ubicación del área de estudio y vías de acceso	7
Clima y Vegetación	8
Relieve e Hidrografía	8
Relieve	8
CAPÍTULO II.....	9
Marco Geotectónico y Geológico.....	9
Geotectónica	9
Geología Regional	9
Paleozoico	9
Mesozoico.....	10
Terciario	10
Plioceno	10
Cuaternario	11
Rocas intrusivas	11
Geología local	11
Terciario	12
Rocas intrusivas	12
Fisuración del área de estudio	12
Hidrogeología	13

CAPÍTULO III:	16
METODOLOGÍA	16
Trabajo de campo	16
CAPITULO IV	36
Resultados y Discusión	36
Ensayo de Humedad Natural	36
Ensayo de Textura de Suelo	53
Ensayo de infiltrómetro	64
Análisis de Láminas Delgadas	72
Elaboración de mapas temáticos según los criterios evaluados.....	79
Ponderación de capas temáticas	86
Ponderación de las subclases.....	88
Mapa de Potencial de ocurrencia de agua subterránea y validación.	92
CAPÍTULO V	96
Conclusiones y Recomendaciones.....	96
Referencias	98

Índice de Figuras

Fig.1: Mapa de Ubicación del área de estudio.....	7
Fig.2: Distrito Zaruma Portovelo	11
Fig. 3: Mapa Geológico del Distrito Zaruma-Portovelo.....	13
Fig.4: Mapa hidrogeológico de Ecuador. Modificado	14
Fig.5: Distribución de las formaciones geológicas cuyas recargas de acuíferos se dan por fisuramiento.	15
Fig. 6: Mapa de Puntos de Infiltrómetro. (Villacís, K., 2020)	20
Fig.7 Tasa de Infiltración de agua en el suelo vs Tiempo	21
Fig. 8: Humedad del suelo vs Textura de Suelo.....	22
Fig.9: Mapa de muestreo de suelo. (Villacís, K., 2020)	23
Figura 10: Flujograma del método organoléptico	25

Fig. 11: Triángulo de Textura de Suelo	26
Fig.12: Muestreo del perfil 1 con auger (Villacis, K., 2020).....	36
Fig. 13: Muestreo del perfil 2 con auger. (Villacis, K., 2020)	38
Fig. 14: Muestreo del perfil 4 con auger (Villacis, K., 2020).....	41
Fig. 15: Muestreo del Perfil 5 con auger (Villacis, K., 2020).	43
Fig. 16: Muestreo del Perfil 6 con auger (Villacis, K., 2020).	45
Fig. 17: Muestreo del Perfil 7 con auger. (Villacis, K., 2020)	46
Fig. 18: Muestreo del Perfil 9 con auger. (Villacis, K., 2020).	49
Fig.19: Muestreo del Perfil 10 con auger (Villacis, K., 2020).	51
Fig. 20: Textura Franca (Villacís, K., 2020).....	54
Fig. 21 Textura Franco Arenosa (Villacís, K., 2020).....	55
Fig.22: Textura Arcillo Arenosa (Villacís, K., 2020)	56
Fig. 23: Textura Franco Arcillo Arenosa (Villacís, K., 2020)	57
Fig. 24: Textura Arcillo Arenosa (Villacís, K., 2020)	58
Fig. 25: Textura Franco Arcillosa (Villacís, K., 2020)	59
Fig. 26: Textura Franca (Villacís, K., 2020).....	60
Fig. 27: Textura Franco Arcillosa (Villacís, K., 2020)	61
Fig. 28: Textura Franco Arcillo Arenosa (Villacís, K., 2020)	62
Fig. 29: Textura Arcillosa Arenosa (Villacís, K., 2020)	63
Fig.30: Velocidad de Infiltración vs Tiempo del ensayo N°1 (Villacís, K., 2020) ...	65
Fig. 31: Velocidad de Infiltración Vs Tiempo del ensayo N°2 (Villacís, K., 2020) ..	66
Fig. 32: Velocidad de Infiltración vs Tiempo de infiltrómetro N 3 (Villacís, K., 2020)	67
Fig. 33: Velocidad de infiltración Vs Tiempo de infiltrómetro N° 4 (Villacís, K., 2020).....	68
Fig. 34: Velocidad de Infiltración vs Tiempo de infiltrómetro N° 5, (Villacís, K., 2020).....	69
Fig.35: Velocidad de Infiltración vs Tiempo de infiltrómetro N°6, (Villacís, K., 2020)	70
Fig. 36: Velocidad de Infiltración vs Tiempo del infiltrómetro N° 7 (Villacís, K., 2020).....	71
Figura 37: RX1 - M1, Fotografía (Izq.) Nícoles Cruzados y (Der.) Nícoles Paralelos (Villacís, K., 2020).....	73

Figura 38: RX2-M2 – KV002, Fotografía (Izq.) Nícoles Cruzado, fotografía (Der.) Nícoles Paralelo. (Villacís, K., 2020).	75
Fig. 39: RX3 - M2-KV003 (Villacís, K., 2020)	77
Figura 40: Rx3-M2, Fotografía (Izq.) Nícoles Cruzado, Fotografía (Der.) Nícoles Paralelo.	77
Fig. 41: LÁMINA No. RX4-T12-KV004	79
Fig. 42: Mapa de Precipitaciones (Villacís, K., 2020)	80
Fig. 43: Mapa de Litología, (Villacís, K., 2020)	81
Fig. 44: Mapa de Densidad de Drenaje, (Villacís, K., 2020)	82
Fig. 45: Mapa de Pendiente, (Villacís, K., 2020)	83
Fig.46: Mapa de Infiltración, (Villacís, K., 2020)	84
Fig. 47: Mapa de Textura de Suelo, (Villacís, K., 2020)	85
Fig. 48: Mapa de Uso de Suelo, (Villacís, K., 2020)	86
Fig.49: Mapa de Potencial Hidrogeológico, (Villacís, K., 2020).	93
Fig.50: Imagen Satelital Tierra/Agua de la microcuenca Zaruma Urcu	95

Índice de Tablas

Tabla 1 Velocidad de Infiltración del agua en el suelo expresado en mm/h	21
Tabla 2: Índice aleatorio de consistencia de Saaty 1980, para diferentes valores de n	33
Tabla 3: Bandas de imágenes satelitales Landsat 8	34
Tabla 4: Ensayo de Humedad Natural a cada muestra del Perfil 1 (Villacís, K., 2020)	37
Tabla 5: Ensayo de Humedad Natural a cada muestra del Perfil 2 (Villacís, K., 2020)	39
Tabla 6: Ensayo de Humedad Natural en cada muestra del Perfil 3 (Villacís, K., 2020).	40
Tabla 7: Ensayo de Humedad Natural a cada una de las muestras del Perfil 4 (Villacís, K., 2020)	42
Tabla 8: Ensayo de Humedad Natural en cada una de las muestras del Perfil 5 (Villacís, K., 2020)	43
Tabla 9: Ensayo de Humedad Natural en cada una de las muestras del Perfil 6 (Villacís, K., 2020)	46

Tabla 10: Ensayo de Humedad Natural a cada una de las muestras del Perfil 7 (Villacís, K., 2020).....	47
Tabla 11: Ensayo de Humedad Natural 8 (Villacís, K., 2020).....	48
Tabla 12: Ensayo de Humedad Natural a cada una de las muestras del Perfil 9 (Villacís, K., 2020).....	49
Tabla 13: Ensayo de Humedad Natural 10 (Villacís, K., 2020).....	52
Tabla 14: Ensayo de Infiltrómetro N° 1 (Villacís, K., 2020)	65
Tabla 15: Ensayo de infiltrómetro N° 2 (Villacís, K., 2020)	66
Tabla 16: Ensayo de Infiltrómetro N°3 (Villacís, K., 2020)	67
Tabla 17: Ensayo de infiltrómetro N°4 (Villacís, K., 2020)	68
Tabla 18: Ensayo de Infiltrómetro N° 5 (Villacís, K., 2020)	69
Tabla 19: Ensayo de infiltrómetro N° 6 (Villacís, K., 2020)	70
Tabla 20: Ensayo de Infiltrómetro N° 7 (Villacís, K., 2020)	71
Tabla 21: Encuesta tipo realizada a expertos, (Villacís, K., 2020).	87
Tabla 22: Radio de consistencia según Saaty de la encuesta N°1	87
Tabla 23: Análisis Jerárquico de la microcuenca Zaruma Urcu.....	88
Tabla 24: Matriz Comparativa de Textura de Suelo. CR= 0,0834.....	89
Tabla 25: Matriz Comparativa de Litología. CR= 0,0478	89
Tabla 26: Matriz comparativa de Uso de suelo. CR= 0,0833	90
Tabla 27: Matriz Comparativa de Precipitación. CR= 0,0138.....	90
Tabla 28: Matriz Comparativa de Pendiente. CR= 0,0928	91
Tabla 29: Matriz Comparativa de Infiltración. CR= 0,03	91
Tabla 30: Matriz Comparativa de la Densidad de Drenaje. CR= 0,083	92

Índice de Anexos

Anexo 1: Tabla de cálculo de velocidad de infiltración	102
Anexo 2: Ensayo de Infiltrómetro en la microcuenca Zaruma Urcu.	102
Anexo 3: Instrumentos para el análisis de textura y humedad natural.	103
Anexo 4: Muestras de perfiles de suelo N° 1, 2, 3, 4, 5, para determinar su textura.	103
Anexo 5: Muestras de perfiles de suelo N° 6, 7, 8, 9.	104
Anexo 6: Muestra del Perfil N° 10.....	104
Anexo 7: Ensayo de análisis de textura en el laboratorio, mediante el Método Organoléptico.....	105
Anexo 8: Matriz Comparativa N°1 para Jerarquizar las variables a utilizar.	105
Anexo 9: Índice de Consistencia de la matriz N° 1	105
Anexo 10: Matriz Comparativa N°2 para Jerarquizar las variables a utilizar.	106
Anexo 11: Índice de Consistencia de la matriz N°2.....	106
Anexo 12: Matriz Comparativa N° 3 para Jerarquizar las variables a utilizar.	106
Anexo 13: Índice de Consistencia de la matriz N° 3.....	107
Anexo 14: Matriz Comparativa N° 4 para Jerarquizar las variables a utilizar.	107
Anexo 15: Índice de Consistencia de la matriz N°4.....	107
Anexo 16: Matriz Comparativa N° 5 para Jerarquizar las variables a utilizar.	108
Anexo 17: Índice de Consistencia de la Matriz N°5.....	108

CAPÍTULO I

Introducción

La información acerca del agua subterránea en el Ecuador es limitada, ya que se publica de forma discontinua, pero con el pasar del tiempo ha ido creciendo y tomando más importancia, dado que las aguas superficiales se están agotando o contaminando (Terán , 2018).

Uno de los principales problemas del agua subterránea trata de que en Ecuador no existe una institución que regule el manejo y cuidado de las aguas subterráneas de forma individual; debido a que se usan los mismos criterios que las aguas superficiales; se realizan trabajos para desarrollar de forma adecuada los respectivos reglamentos (Terán , 2018).

Las regiones geográficas tales como Costa, Sierra, Oriente y Galápagos corresponden a las 4 regiones hidrogeológicas, las cuales están basadas en los límites de acuíferos o formaciones geológicas (U.S Southern Command Engineer's; U.S. Army Corps of Engineers District in Mobile. & U.S Army Corps of Engineers Topographic, 1998).

La microcuenca Zaruma Urcu, pertenece a la cuenca hidrográfica Jubones cuya extensión es de 32154,88 km². (CEPAL), esta microcuenca, cuya extensión es de 5,22 km², está conformada por redes de drenaje menores, su red principal es la Quebrada denominada Zaruma Urcu, la cual desemboca en la subcuenca del Río Calera.

Uno de los principales problemas es la falta de información acerca de la hidrogeología del Ecuador y del sector de Zaruma, además del desactualizado Mapa Geológico de Zaruma ejecutado en 1976.

Para poder encontrar la disponibilidad de agua subterránea, se debe tener como base el Mapa Hidrogeológico Nacional, el cual data de 1983, desde ese entonces, no se han realizado actualizaciones, a excepción del elaborado por la Espol Tech EP, la Secretaria de Agua, INAMHI y Municipalidad de Quito en el año 2014, el cual no ha sido publicado (Secretaría del Agua; Inamhi;

Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito; Espol, 2016).

El presente trabajo de titulación está enfocado en la búsqueda de áreas con probabilidad de ocurrencia de agua subterránea, aplicando el método del análisis multicriterio usando GIS (Sistema de Información Geográfica por sus siglas en inglés). Dicho método se destaca por la selección de variables (litología, pendientes, precipitación, densidad de drenaje, textura del suelo, geología estructural, geomorfología y permeabilidad) que mayor influencia tienen en el estudio, para luego darles un valor ponderado y posterior a esto, realizar la superposición de capas, dando como resultado un mapa de potencial hidrogeológico.

Esta investigación genera nuevos puntos o zonas con potencial de ocurrencia de agua subterránea, creando así un gran interés científico, social y económico, para posteriores estudios de búsqueda y captación de aguas subterráneas.

Además se validará una metodología regularizada, la cual permitirá una rápida evaluación de zonas con potencial de ocurrencias de agua, a ser utilizados en futuras planificaciones de manejo de agua subterránea.

Antecedentes

Durante los años 1994-1997 en la provincia de El Oro, hubo una drástica sequía que redujo el flujo de las corrientías intermitentes en las zonas altas de la cordillera (Buckalew, James O. et al, 1998).

Zaruma es una ciudad que se encuentra ubicada en la zona montañosa de la cordillera de los Andes. Tiene pendientes que van desde 40%-70%, con un relieve irregular, presenta zonas altas disectadas y encañonadas de donde nacen algunos ríos como: Salvias, Ortega, Amarillo y El Salado. Esta ciudad pertenece a la Cuenca Alta del Río Jubones y Puyango, cuyas superficies son de 41,08% y 58,92% respectivamente. (GAD Zaruma, 2018).

Para la realización de este estudio se cuenta con poca información que valide una metodología para la búsqueda de ocurrencia de agua subterránea, por lo cual se han buscado artículos y trabajos de tesis de los últimos 5 años para definir un modelo a seguir, el cual usaría variables semejantes a las usadas en otras investigaciones.

Macas Espinosa & López-Escobar en 2018 realizaron un estudio para búsqueda de áreas potenciales, para explorar aguas subterráneas empleando imágenes satelitales, precipitaciones, condiciones geológicas del sector, permeabilidad, densidad de drenaje, pendientes. Dicha metodología está basada en análisis multicriterio, para generar mediante Sistemas de Información Geográfica un mapa final donde se encuentren las áreas potenciales a encontrar agua subterránea. Esta información fue validada con datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador, mediante puntos de agua.

En India en una región insular llamada Sri Lanka en 2014, Senanayake, Dissanayake, et., aplicaron técnicas GIS para delinear zonas con potencial de recarga de aguas subterránea. Se usaron las capas temáticas como precipitaciones, lineamientos, pendientes, densidad de drenaje, uso del suelo, litología y geomorfología. Los autores de este estudio definen que puede ser extendido en otros lugares donde existan zonas secas para identificar áreas con potencial de aguas subterráneas.

En el año 2016 Akinlalu, Adegbuyiro, et., emplearon el análisis multicriterio para la predicción de potencial de recursos de agua subterránea, donde se usaron variables semejantes tales como litología, geomorfología, densidad de drenaje, uso de suelos, precipitaciones; este modelo fue verificado mediante información de pozos en el área de estudio en Nigeria.

Bravo Peña Luis, Sáenz López David, et., en 2015 ubicaron áreas de recarga hídrica en el acuífero Cuauhtémoc, México, mediante una evaluación de análisis multicriterio, usando la superposición de capas de las siguientes variables: geología, densidad de fracturas y alineamientos, edafología, uso del suelo y cobertura vegetal, siendo así un modelo cartográfico que puede orientar la prospección de aguas subterráneas en campo.

Objetivos

Objetivo General

- Determinar zonas con potencial hidrogeológico en la microcuenca Zaruma Urcu, mediante análisis multicriterio.

Objetivos Específicos

1. Recopilar información bibliográfica para la identificar de variables geológicas, geomorfológicas y ambientales, relacionadas a la existencia de agua subterránea.
2. Caracterizar y validar las variables que influyen en la ocurrencia de aguas subterráneas (textura de suelo, litología, densidad de drenaje, precipitaciones, uso de suelo, infiltración y pendiente).
3. Elaborar mediante la aplicación de Evaluación multicriterio (EMC) el mapa de potencial hidrogeológico de la microcuenca Zaruma Urcu.

Área de estudio

Ubicación del área de estudio y vías de acceso

El presente trabajo de titulación se realizó en la ciudad de Zaruma en la microcuenca Zaruma Urcu, cuya quebrada principal lleva el mismo nombre; su extensión es de 5,18 km², se encuentra ubicado en el Barrio Ramírez Pamba. Las vías de acceso son de primer orden y están en muy buen estado, se puede llegar hasta este sitio de forma aérea, por la ruta Quito-Guayaquil-Santa Rosa y a partir de Santa Rosa mediante uso de transporte inter-cantonal a una distancia de 3 horas aproximadamente. El acceso por vía terrestre es a través la ruta Guayaquil-Machala-Piñas-Zaruma usando transportes interprovinciales. Dentro del área de estudio las vías son de primer y segunda orden y también se encuentran senderos en algunos sectores.

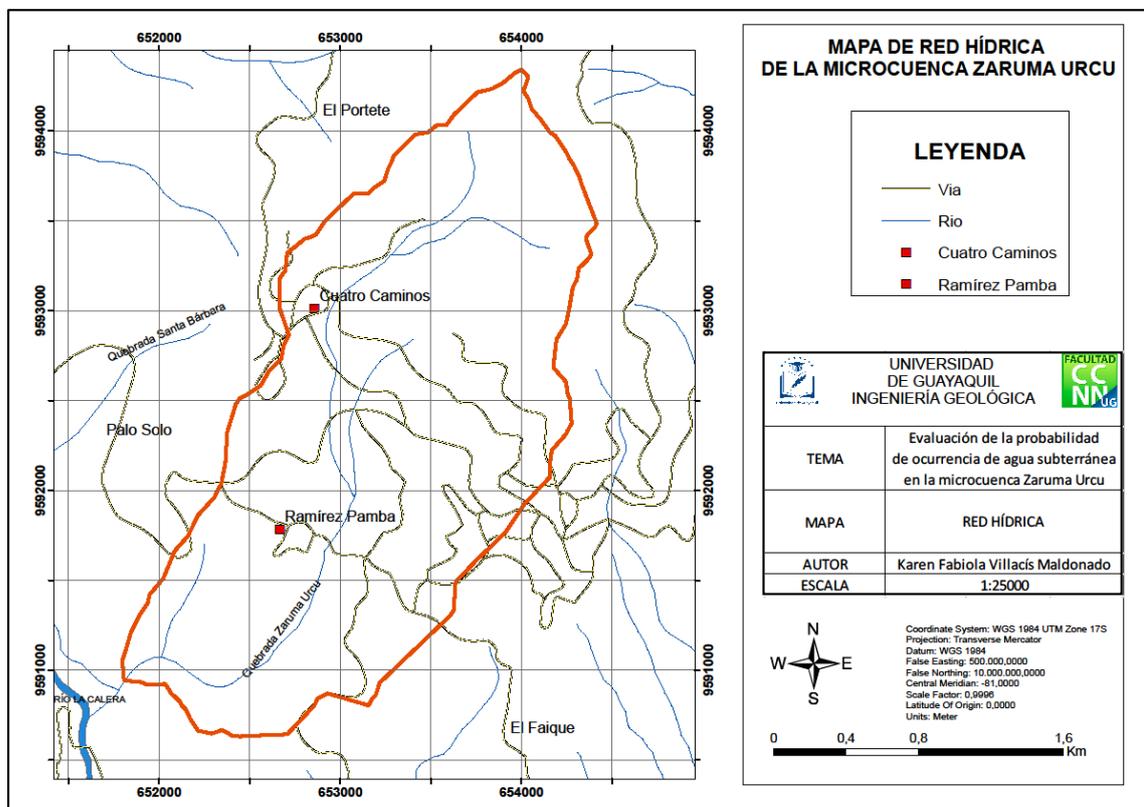


Fig.1: Mapa de Ubicación del área de estudio

Clima y Vegetación

Según Köppen y Geineser describieron los tipos de clima aplicando letras, basándose en la vegetación de cada lugar en específico; entre los parámetros utilizados están las temperaturas y precipitaciones, donde el clima del cantón Zaruma está especificado como tropical. Cabe indicar que en el verano, durante los meses de noviembre-febrero existen más lluvias, a diferencia del tiempo de invierno.

Zaruma se clasifica como Aw (Sabana), este clima es común en zonas que se van alejando del Ecuador. La precipitación media aproximada es de 1547 mm.

Relieve e Hidrografía

Relieve

Zaruma es una ciudad montañosa de la provincia de El Oro, pertenece a un ramal que conecta con la Cordillera de los Andes, llamada Cordillera Vizcaya. El área donde se encuentra la microcuenca Zaruma Urcu, posee un relieve que varía entre 720 m.s.n.m en su cota más baja y 1560 m.s.n.m. siendo la cota más alta.

Hidrografía

Se encuentra en la cabecera de la cuenca del Río Puyango, entre los ríos Calera y Amarillo. Uno de los principales componentes hidrográficos se trata del Río Calera, que tiene como tributario y origen el río Salado, y las quebradas Arcapamba, Santa Bárbara, Cascajo y Zaruma Urcu entre otras.

CAPÍTULO II.

Marco Geotectónico y Geológico.

Geotectónica

Las zonas mineralizadas del Distrito Zaruma-Portovelo y Pucará-Alausí, han sido integradas dentro de la zona del Distrito Azuay. Sus límites geológicos son: Norte: Campo Mineral Molleturo, Sur: Falla Piñas-Portovelo, Este: Megaestructura Regional Peltetec y Oeste: Provincia Geológica de la Costa (Litherland et al, 2014).

Según Litherland, 2014, los Terrenos Chaucha y Tahuín tuvieron una acreción al Terreno Alao (oceánico) el cual se manifiesta a través de la falla Peltetec. De la misma forma la colisión que tuvieron los terrenos metamórficos mencionados con anterioridad, se manifiesta en la Falla Piñas-Portovelo.

Geología Regional

La faja de mineralización de la zona Zaruma-Portovelo (aurífera y polimetálica), se encuentra ubicada al S de la Cordillera Occidental, en la parte SO de los Andes.

Este sector posee una geología que abarca desde el Paleozoico hasta el Triásico, representada por los terrenos continentales Chaucha-Tahuín; existen rocas cretácicas de los terrenos con afinidad oceánica denominada Pallatanga y rocas terciarias que pertenecen al Terreno Macuchi.

A continuación se describen las unidades geológicas del SO de los Andes:

Paleozoico

Unidad Chiguinda

Corresponde a rocas metasedimentarias semipelíticas, cuyo origen se encuentra en el Terreno Loja, aflorando este tipo de rocas en la parte SO de los Andes (Bonilla, W., 2010).

Según Litherland et al., 2014, esta unidad, formada probablemente en una cuenca intracratónica de fuente continental, está conformada por una secuencia espesa monótona de cuarcitas, metalimolitas, esquistos grafiticos, filitas negras, pizarras y escasas metagrauvacas.

Rocas metamórficas

Estas rocas forman parte del Terreno Chaucha-Tahuín, formando parte del Complejo Metamórfico El Oro, del lado suroccidental. Aflora en la Cordillera Tahuín al Sur de Portovelo.

Al Norte de la falla Piñas-Portovelo a estas rocas metamórficas se les asigna una edad del Jurásico-Cretácico Inferior, estando formadas por esquistos verdes, filitas gráficas y lentes de serpentina.

Mesozoico

Jurásico

Aflora al Sur de la falla Jubones, conformada por rocas ultrabásicas y básicas, entre ellas las harzburgitas cuya composición está dada por olivino, ortopiroxeno y antigorita y en menor proporción por anfíbol. La edad data desde el Jurásico hasta el Cretácico Inferior, según Litherland et al., 1994.

Terciario

Volcánicos Saraguro (E-Ms)

Dunkley y Gabibor (1997) determinaron que estos volcánicos datan del Eoceno Superior. Están distribuidos en todo el SO de la Cordillera de los Andes, representando un 40% del territorio, se encuentran conformados por tobas soldadas de flujos de ceniza, de composición riolítica a dacítica. Además de lava basalto andesíticas, material volcánico retrabajado, brechas, tobas de ceniza fina y lavas con intercalaciones de areniscas, silitas y argilitas (Bonilla, W., 2010).

Plioceno

Formación Pisayambo

Esta formación recubre los Terrenos Aloa y Chaucha y suprayace a la Unidad Pallatanga, comprende una litología formada por piroclastos y flujos de lava de composición andesíticas – basálticas a riolítica (Perez, J., 2019).

Cuaternario

Abanico Aluvial

Estos depósitos cubren los Volcánicos Saraguro, siendo los sedimentos más recientes, conformado por un conjunto de gravas, arenas y limos, que en algunas ocasiones pueden tener horizontes arcillosos (Bonilla, W., 2010).

Rocas intrusivas

En la parte Sur de los Andes Ecuatorianos, están intruyendo cuerpos pequeños tanto riolíticos, granodioríticos y dioríticos pertenecientes a la Unidad Portovelo, cuya orientación es NO-SE, casi paralelo a la sutura Piñas-Portovelo. (Bonilla, W., 2010)

Geología local

El Distrito Zaruma-Portovelo, la zona más estudiada es el Sur, la cual se encuentra cercana a la falla regional Piñas-Portovelo, esta falla se muestra en la Fig. 2, junto a las unidades geológicas del distrito.

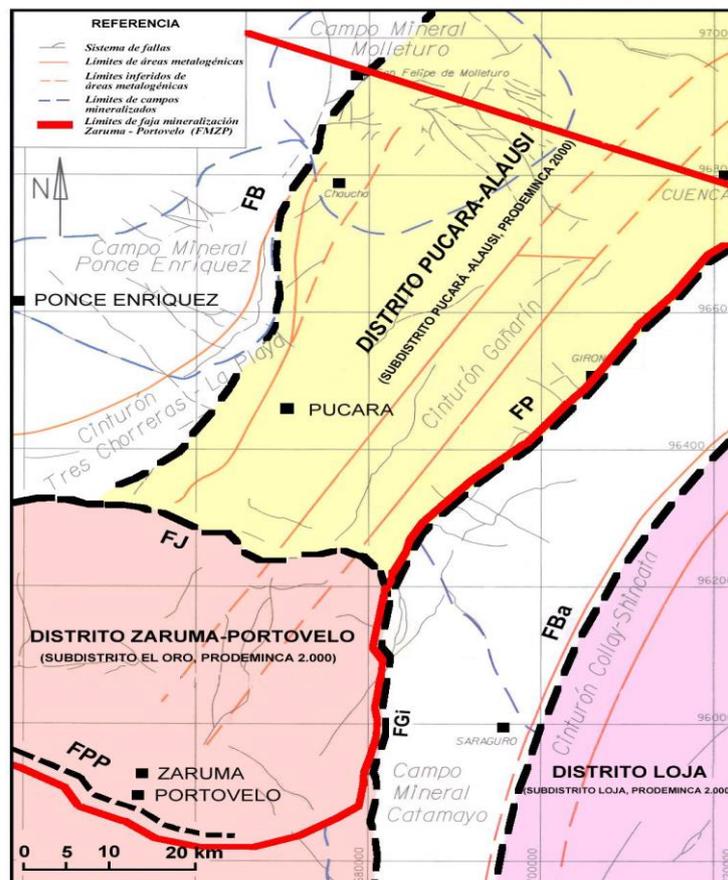


Fig.2: Distrito Zaruma Portovelo
(Fuente: Bonilla, W., 2009)

Terciario

Oligoceno

Unidad Portovelo

Billingsley (1926) y Pratt et al. (1997) fueron quienes descubrieron, estudiaron y definieron respectivamente a esta unidad, que se halla en contacto tectónico con las rocas metamórficas del Complejo El Oro, a lo largo de la Falla Piñas-Portovelo.

Esta unidad aflora en la ciudad de Zaruma, en Malvas, Arcapamba y Huertas (Bonilla, W., 2010).

Serie Muluncay: Corresponde a la base de la serie Portovelo y se encuentra conformada por brechas volcánicas, tobas y flujos de composición andesítica e ignimbritas.

Serie Portovelo: Esta serie se encuentra subyacente a la serie Faique, está representada por lavas andesíticas y basalto-andesíticas, poseen un rumbo NO-SE, con una inclinación que oscila entre los 35° y 40°.

Serie Faique: Se encuentra suprayacente a la Serie Portovelo, su litología es similar a la serie Portovelo, con la única diferencia de que esta serie posee una mayor proporción de tobas, con algunos intrusivos subvolcánicos, que al Sur afloran entre Zaruma y Portovelo (Spencer et al., 2002), tales como los dioríticos, granodioríticos, monzoníticos cuarzosos y riolíticos (Bonilla, W., 2010).

Rocas intrusivas

La Unidad Portovelo, no contiene minerales auríferos, ni tampoco presenta vetas en toda la región, tan sólo en el distrito Zaruma. Se encuentran 4 tipos de intrusivos: Granitoides gruesas, Cuarzo Mononítico cuya textura es mediana con gran contenido de pirita, Andesitas labradoritas de textura media a gruesa, muy parecido al basalto y Diques Riolíticos Ácidos, remanentes de este dique, quedaron en algunas colinas más altas. (Billingsley, P., 1926)

Fisuración del área de estudio

Según Billingsley las máximas tensiones y formaciones de fisuras en Zaruma se dieron por la intrusión de grandes batolitos graníticos y sus pulsaciones, y al

momento de enfriarse toda la región fue forzada a estabilizarse en una nueva base, dicho ajuste provocó la inclinación de todas las formaciones presentes.

La única formación que no pudo deformarse fue la Unidad Portovelo, dado que se trata de rocas masivas y rígidas, siendo sólo sacudida, formando grietas y fisuras, las cuales cruzaron desde el Sur de Portovelo hacia el Norte de Zaruma. (Billingsley, P., 1926)

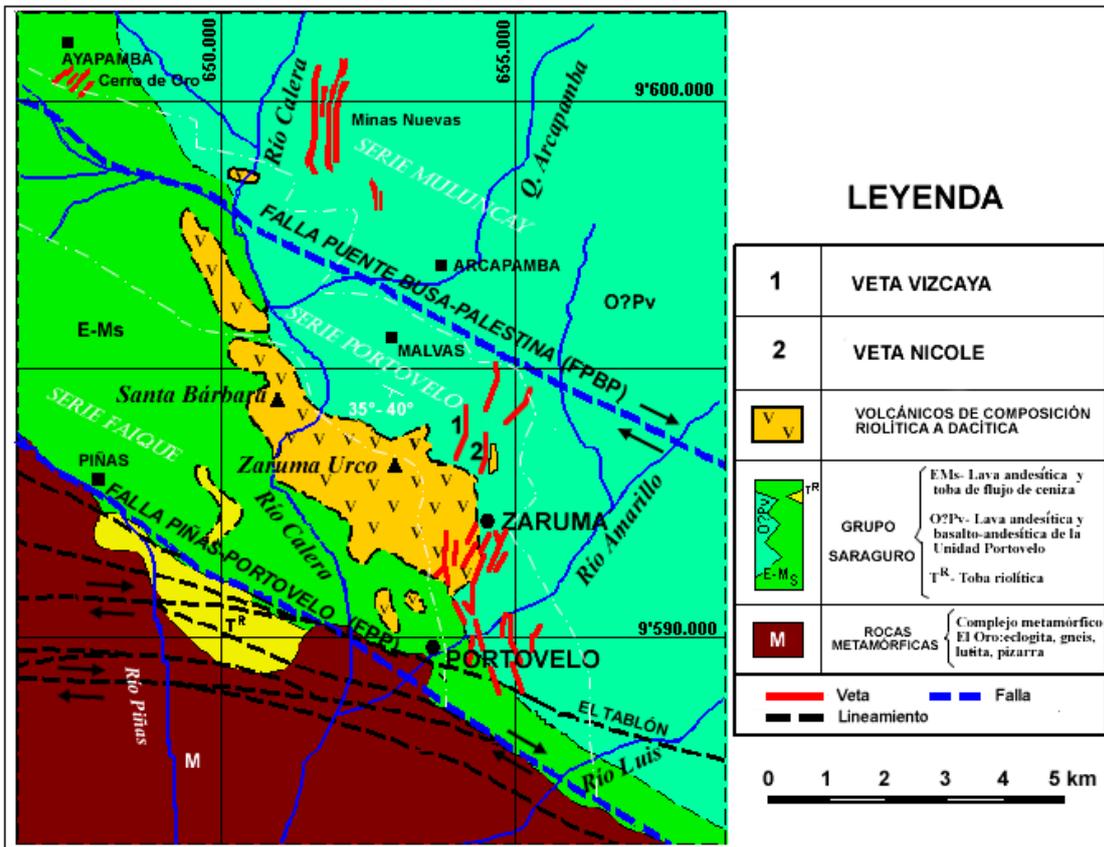


Fig. 3: Mapa Geológico del Distrito Zaruma-Portovelo (Fuente: Bonilla, W., 2009).

Hidrogeología

El Cantón Zaruma se encuentra dominado por dos ríos principales que dividen morfológicamente a este sector, se trata de los ríos Calera y Amarillo, cuyo caudal constante aporta significativamente en la zona de Portovelo al suroccidente de Zaruma, cuyo caudal es de 22,98 m³/s (Oliva, A., & Ruiz, A., 2015).

La zona de estudio se caracteriza por poseer un sistema de acuífero tipo fisurado-libre.-interior, el cual se encuentra dominado por las grietas, por el cual el agua circula libremente gracias a este fracturamiento. Se han realizado

Según estudios del Inamhi, 2014, la acumulación de agua subterránea en el sector, se da por Fisuración o por grietas presentes en las rocas. En la Fig. 5, se observa las formaciones cuyos acuíferos se dan por zonas de debilidad, dentro de la cual se encuentra la Formación Volcánicos Saraguro.

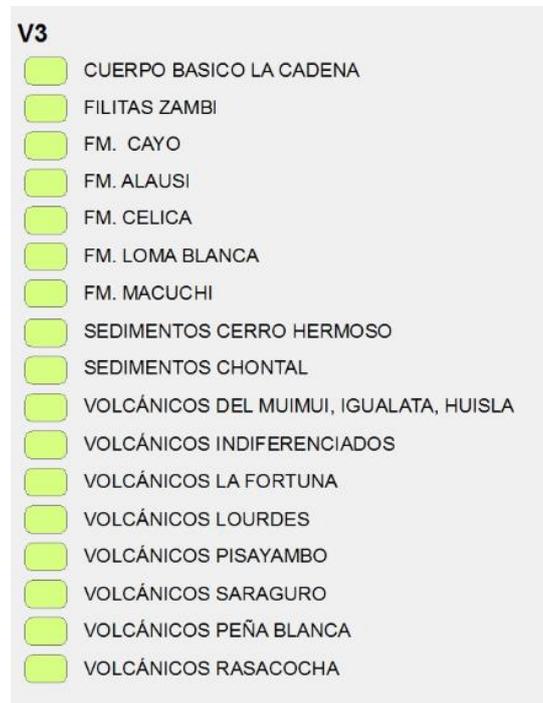


Fig.5: Distribución de las formaciones geológicas cuyas recargas de acuíferos se dan por fisuramiento.

Fuente: Inamhi, 2014

CAPÍTULO III:

METODOLOGÍA

El presente trabajo de titulación se realizó en 4 etapas:

Primera etapa: trabajo de oficina

Se realizó la recopilación de información del sector, tal como mapas geológicos, hidrogeológicos, papers, tesis, artículos científicos, libros, manuales para la búsqueda de agua subterránea en rocas duras, informes hidrogeológicos, entre otros.

Los mapas obtenidos durante la compilación de información fueron:

- Mapa topográfico de Zaruma a escala 1:50000 y en formato shape.
- Mapa geológico de Zaruma a escala 1:100000 de 1980 en formato jpg y shape.
- Mapa Geológico del Ecuador elaborado por el INIGEMM, 2017
- Mapa Hidrogeológico del Ecuador.

Para determinar la probabilidad de existencia de agua subterránea en la microcuenca Zaruma Urcu, se empleó una metodología basada en un análisis multicriterio, para poder clasificar zonas que tengan mayor o menor potencial de ocurrencia de agua subterránea, utilizando parámetros los cuales serán ponderados mediante consulta a expertos en el tema.

Trabajo de campo

Materiales

- Infiltrómetro de doble anillo
- Cronómetro
- Auger
- Fundas Ziplop
- Martillo
- Combo
- Cincel
- Flexómetro
- Brújula

- GPS marca Garmin
- Lupa geológica de 10x y 20x
- Rayador e imán
- Ácido clorhídrico

Se realizaron ensayos de infiltración mediante infiltrómetro de doble anillo, y ensayos de suelo usando la herramienta llamada auger, además se tomaron datos tales como:

- Ubicación georreferenciada mediante GPS GARMIN ETREX10, con Datum WGS84, ubicando éstos puntos en el mapa base usado para el campo tanto para el ensayo de auger y el de infiltrómetro.
- Reconocimiento litológico dentro la microcuenca Zaruma Urcu mediante el uso de la lupa geológica de 10X y 20X para reconocer los diferentes tipos de minerales existentes.
- Realizar un levantamiento geológico de afloramientos con su respectiva toma de datos estructurales.
- Levantamiento de la red de drenaje con su respectiva orientación.
- Recolección de muestras de rocas (de mano y para lámina delgada) y suelos, siendo cada uno de ellos guardados en fundas especiales con su respectiva codificación.

Para recoger información adecuada en el campo se empleó un Manual para el reconocimiento de los suelos y respectiva descripción de la FAO, 2009.

Antes de llevar a cabo la descripción total del suelo, se deben establecer parámetros que permitan conocer preliminarmente el perfil del suelo a describir, entre ellos están:

- Colocar el número del perfil e infiltrómetro que estará conformado por dos códigos: alfabético para mencionar el lugar y numérico para el número del perfil. Para el código alfabético se usarán las normas ISO 3166-2, el cual es un “Estándar internacional para los códigos de país”, acompañado de la referencia del mapa topográfico del lugar o zona a realizar el estudio, en este caso cada perfil será codificado de la

siguiente manera: EC/ZAR- 001= Zaruma en Ecuador, perfil 1, y para el infiltrómetro EC/ZAR-I001= Zaruma en Ecuador, infiltrómetro 1.

- La fecha de descripción es uno de los parámetros más importantes, ya que con esta información se puede dar a conocer de la actualidad de los estudios, sirviendo para futuras investigaciones a realizarse. Será codificado mediante 6 números, empezando por el año, mes y día, ejemplo: 191112 – 12 de noviembre de 2019.
- Autores, es decir, el nombre de las personas que realizaron la perforación para la recolección de las muestras, usando la primera letra del nombre y apellido (FAO, 2009).

Auger

A lo largo de mucho tiempo se han usado augers durante las exploraciones geológicas y geotécnicas, pero para estudios de aguas, su uso ha sido muy limitado. A pesar de que hay varios métodos de perforación, actualmente algunos prefieren usar el auger por su facilidad y su disponibilidad en la recolección de las muestras (Kovalevsky, V.S. et al., 2004).

Existen 3 tipos de auger:

- Auger manual
- Auger de vástago sólido
- Auger de vástago hueco.

El método usado en este proyecto de investigación fue el auger manual, para conocer la textura y tamaño de las partículas del suelo, para luego proceder a clasificarlo, esta prueba puede llegar hasta profundidades someras, girando hasta llenarse, luego se procede a retirar el auger y la muestra se vierte en fundas Ziploc para que la muestra no pierda su humedad natural.

En éste caso la profundidad máxima alcanzada con este ensayo fue de 2,15m, hubieron ensayos que llegaron hasta 1m de profundidad debido a que se encontraba roca o el instrumento ya no avanzaba a profundizar.

Descripción del suelo

Realizada la perforación para obtener las muestras de suelo, y una vez empaquetadas, se describen cada una de las capas observadas y sus respectivos horizontes visibles, se anota el color y todos aquellos criterios citados en la Guía para la descripción del suelo de la FAO, 2009.

Características de la superficie

De existir, se describen los afloramientos rocosos, en términos de porcentaje, se anota también el tamaño de estos fragmentos.

Límite del horizonte

Estos límites determinan los procesos que ocurrieron en el pasado, los cuales son descritos a través de las profundidades.

Profundidad

La profundidad se tomó a cada uno de los horizontes observados en cada perfil, que pueden ir de cm hasta metros, la mayoría de los límites de suelos son zonas que tienen una transición y no una línea marcada de división. Esta medida se la toma desde la cobertura vegetal del suelo hacia abajo (FAO, 2009).

Estas anotaciones van acompañadas de la foto del perfil. Con todos estos datos se procede a realizar el análisis textural y humedad natural del suelo, usando la clasificación de la USDA, versión 2 del año 2014.

Infiltración: Método de doble anillo.

Para la evaluación de la infiltración de agua en el suelo se usó el equipo denominado “Doble anillo” para conocer la velocidad y capacidad de infiltración, donde los resultados se obtienen a través de una Tabla de cálculos (Anexo 1), para lo cual se debe buscar previamente, sitios donde las pendientes no sean abruptas, dado que el equipo debe quedar nivelado y a una profundidad de aproximadamente 10 cm, debajo de la capa vegetal, para evitar fugas del agua al momento de realizar el ensayo (Fig. 6).

Este ensayo usado ampliamente resulta muy práctico ya que permite humedecer directamente el suelo, llenando primero el anillo exterior para que sirva de sello, luego se introduce unos 20 cm de agua en el anillo interior para comenzar con la prueba de infiltración (Ayala, O. et al., 2015), es decir se satura una parte de suelo, para proceder a anotar las variaciones de los niveles de agua cada dos minutos, dentro del anillo céntrico. (Anexo 2)

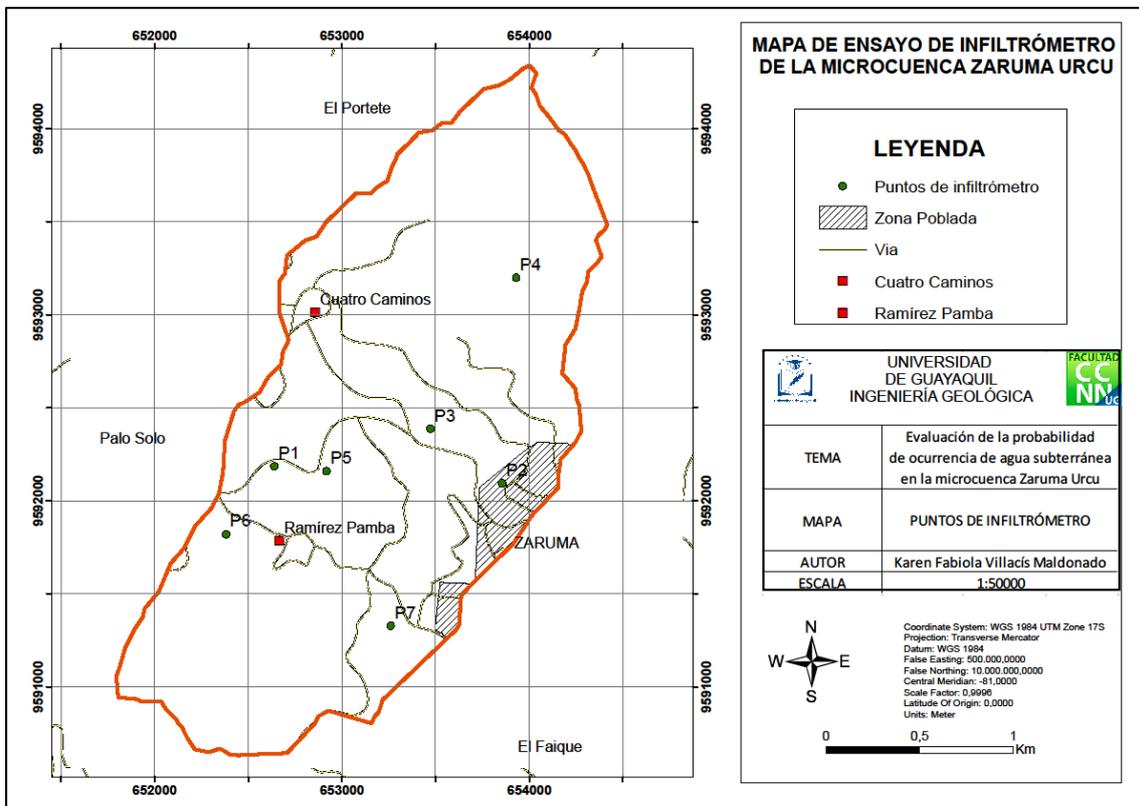


Fig. 6: Mapa de Puntos de Infiltrómetro. (Villacís, K., 2020)

Para este ensayo, primero se procede a recoger la información principal: nombre del lugar, número de infiltrómetro, coordenadas y volumen de agua usada; toda esta información será anotada en la tabla previamente elaborada, en donde además se anotará el tiempo que tarde en infiltrarse el agua en el suelo.

Al inicio de la prueba es probable que las velocidades de infiltración salgan elevadas, poco a poco estos resultados irán disminuyendo conforme pasa el tiempo. Esta velocidad estará dada con la cantidad de agua que ingresa al suelo por unidad de tiempo, expresados en mm/h. (Fig. 7)

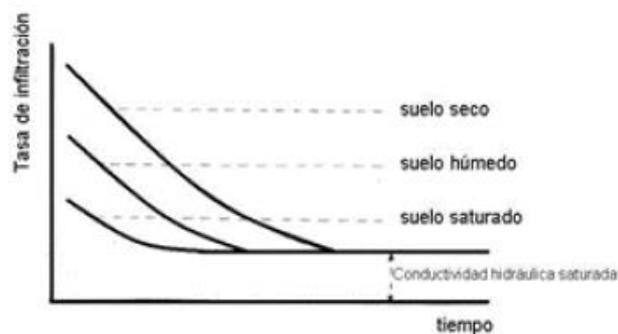


Fig.7 Tasa de Infiltración de agua en el suelo vs Tiempo
Fuente: Ruiz, E., et al.

Los rangos para clasificar la velocidad de infiltración fueron divididos en 4 clases: Muy rápida, rápida, media y lenta.

Tabla 1 Velocidad de Infiltración del agua en el suelo expresado en mm/h

CLASES	VELOCIDAD (mm/h)
Muy rápida	>60
Rápida	20-60
Media	5-20
Lenta	<5

Fuente: MGAP-RENARE, 2014.

Mecanismo de retención de agua en el suelo.

A pesar de que la práctica en el campo es un poco diferente a la parte teórica, existen varias formas de retención en el subsuelo, debido a que no existe un límite definido del estado del agua, además de que un suelo va a actuar de manera muy diferente cuando entra en contacto con el agua (Ruiz, E., et al.).

Tipos de retención de agua (Ruiz, E., et al.).

Capacidad de agua: Es aquel estado en donde el agua, una vez que el suelo ha sido saturado, es retenida y por efecto de la gravedad, puede drenar fácil y libremente a través del espacio poroso del suelo.

Punto de marchitez: Es un estado en donde el agua es retenida por el suelo con una fuerza superior al límite de absorción de las plantas, de este modo las plantas pueden satisfacer sus necesidades.

Agua disponible por la vegetación: Diferencia entre la capacidad de campo y punto de marchitez.

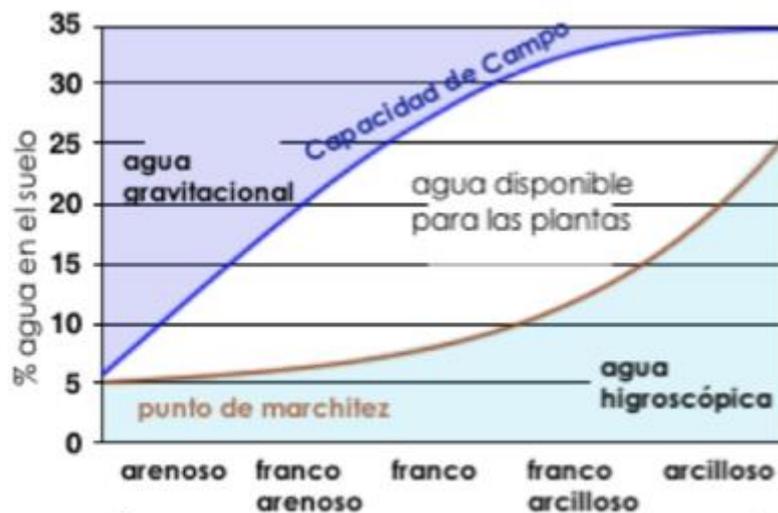


Fig. 8: Humedad del suelo vs Textura de Suelo.

Fuente: Ruiz, E., et al

Tercera Etapa: trabajos de laboratorio

Una vez finalizada la etapa de toma de muestras de rocas y suelos, se procedió a la fase de laboratorio, donde se analizó la información obtenida en el campo, en este caso:

- Las muestras recogidas para el análisis del suelo y su posterior perfil, fueron llevadas al laboratorio para realizar ensayos de humedad natural y textura mediante el uso de tamices.
- Se elaboraron láminas delgadas para poder determinar con mayor exactitud bajo el microscopio la litología y mineralogía de las rocas tomadas en campo, además de las alteraciones presentes en esta microcuenca.

Ensayo para determinar la Humedad Natural

Una vez recogidas las muestras de suelo mediante el auger (Fig. 9) se procedió a reconocer los diferentes horizontes.

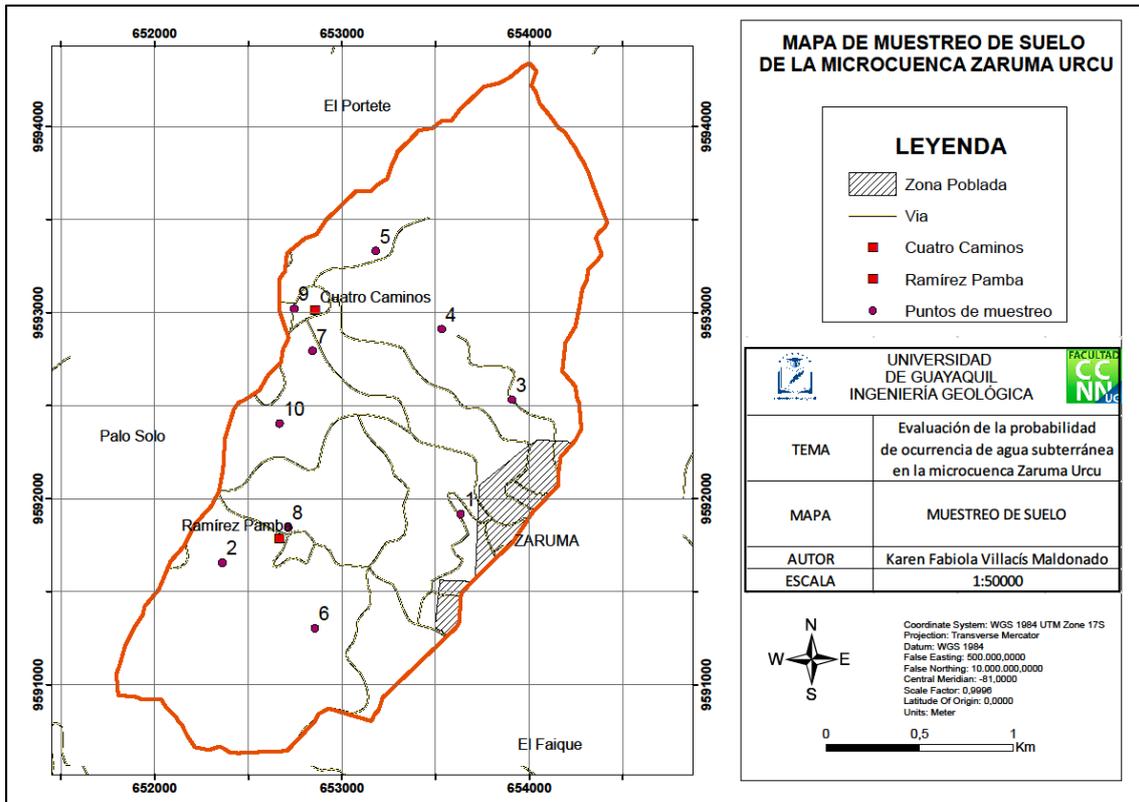


Fig.9: Mapa de muestreo de suelo. (Villacís, K., 2020)

Los materiales usados para este ensayo fueron (Anexo 3):

- Horno de secado
- Balanza cuya aproximación es de 0.1 g
- Recipientes resistentes a cambios de temperatura

Para definir la humedad natural de un suelo las muestras deben estar preservadas y correctamente empaquetadas en fundas herméticas no corrosibles, para evitar que la humedad se pierda, asimismo las muestras deben permanecer a una temperatura apropiada entre 3°C y 30°C (ASTM, 2000).

Para este ensayo el procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Colocar la muestra de suelo seleccionada en un recipiente previamente pesado, limpio y seco.
2. Pesarse el contenedor y la muestra en una balanza y anotar el valor indicado.

3. Una vez pesada la muestra, se procede a secarla en un horno a una temperatura constante de 5°C, el tiempo de secado dependerá de cada una de las muestras a analizar.
4. Luego de que esta haya sido secada de forma uniforme, se espera que el contenedor enfríe y pueda ser manipulado con facilidad, inmediatamente se pesa la muestra seca y se anota su valor (ASTM, 200).

Para realizar los cálculos de la humedad se realiza mediante la siguiente fórmula

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_t} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

W= Contenido de humedad (%)

W_w = Peso del agua.

W_s = Peso seco del material.

W₁ = Peso del contenedor + suelo húmedo, en gramos.

W₂ = Peso del contenedor + suelo secado en horno, en gramos.

W_T = Peso del contenedor, en gramos.

(ASTM, 2000)

Ensayo para determinar la textura del suelo.

Muchas de las propiedades hídricas del suelo se encuentran relacionadas con su textura, la cual es una propiedad estable del mismo que está relacionada con el área superficial de las partículas, dado que depende del tamaño de éstas para conocer la velocidad de infiltración y la capacidad de retención de agua que presentan los suelos en el sector estudiado, es decir, a menor tamaño de partículas del suelo, menor es la velocidad de infiltración del suelo pero mayor es la acumulación o retención del agua en dicho suelo, dando lugar a posibles puntos de agua subterránea (Ibáñez, Juan J., 2006).

Este ensayo se trata de un valor numérico ya sea de arena, limo y arcilla, la cual será determinada de forma manual en el laboratorio, para luego ser ploteado en el triángulo textural (Fig. 10).

Procedimiento:

1. Las muestras de suelo que se encuentran empaquetadas en fundas ziploc, deben ser secadas al sol completamente. (Anexo 4-5-6)
2. Se realiza un cuarteo de la muestra secada al sol y se procede a realizar el método organoléptico, que consiste en sentir con el tacto la cantidad de limo, arcilla o arena. (Anexo 7)

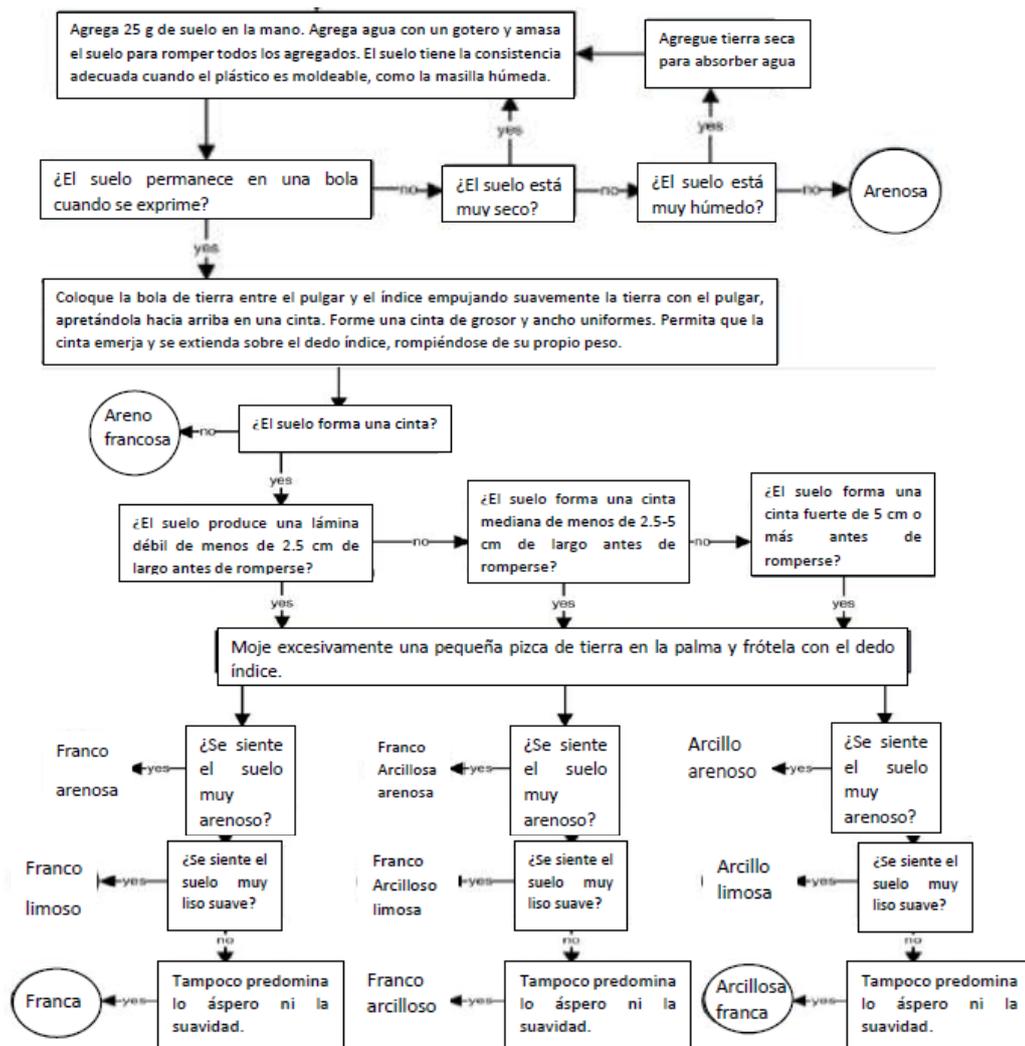


Figura 10: Flujograma del método organoléptico

No existe un método mucho más preciso que aquel realizado por expertos, cuya experiencia lo acredita a reconocer fácil y rápidamente los diferentes tipos de textura en el suelo. Los principales parámetros a reconocer siempre serán la mineralogía de las arcillas, de las fracciones y la cantidad de materia orgánica presente. (Soil Survey Staff, 2014)

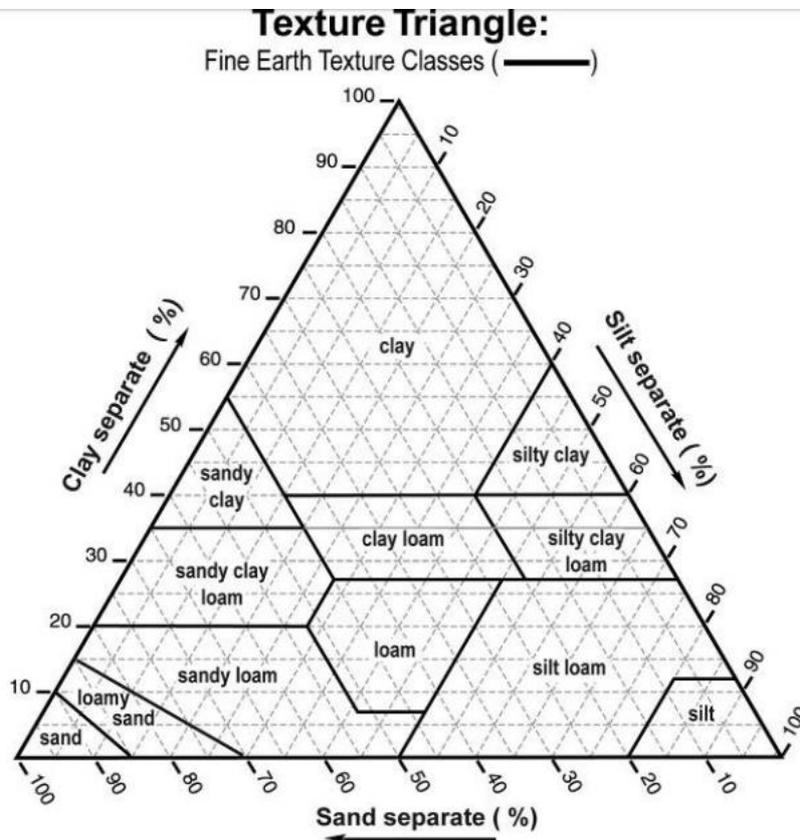


Fig. 11: Triángulo de Textura de Suelo

Fuente: Soil Survey Staff, 2014.

Cuarta Etapa: Trabajo de oficina para el procesamiento de resultados.

Los datos recogidos en el análisis de Doble Anillo, fueron ploteados en un cuadro de Excel, para proceder a calcular la tasa de infiltración del agua en el suelo, de tal manera que se pueda generar un mapa de infiltración con respecto al tiempo.

Asimismo, se realizó el análisis de textura del suelo (Horizonte B) a cada una de las muestras recogidas y como producto final, se obtiene un mapa de textura de suelo de la microcuenca.

Análisis multicriterio

Varios autores han aplicado para el estudio de ocurrencia de aguas subterráneas los factores como litología, densidad de drenaje, densidad de lineamientos, precipitaciones, pendientes, geomorfología, uso de suelo, tipo de suelo, textura del suelo, distancia entre estructuras (Sander et al., 1996; Sener et al., 2005., Guanapuram et al., 2009., K.S.R Murthy et al., 2009., Manap et al, 2011., Andualet. T., 2019., Argaz., 2019).

Estos factores se analizan mediante análisis multicriterio, que es una de las técnicas usadas en los últimos años y es catalogada por algunos investigadores como una herramienta que, al momento de tomar decisiones, provee de información confiable (Shekhar, S. et al., 2014).

La unión de este análisis, los sensores remotos y el programa Arcgis durante las dos últimas décadas ha permitido conocer mejor el comportamiento del agua subterránea y con ello su potencial (Argaz, A. et al., 2019).

Se procesaron capas temáticas (variables o criterios) para realizar la evaluación. El método ha sido exitoso para la ubicación de zonas con mayor o menor potencial hidrogeológico, ya que no usa técnicas costosas, sino factores fáciles de encontrar y verificar (Rincón, S., 2018).

Luego se utilizó una matriz llamada Proceso de Análisis Jerárquico según Saaty (1980), en donde se le asigna un peso a cada uno de los parámetros a

usar, este método ha sido aplicado en algunos estudios hidrogeológicos tanto para el análisis multicriterio, como en técnicas para sensores remotos en GIS.

Los factores o criterios utilizados en este estudio fueron: Precipitaciones, Litología, Densidad de drenaje, Pendientes, Textura del suelo, Infiltración del agua y Uso de suelo.

Precipitación

La lluvia es uno de los factores o parámetros que juega un papel importante en la ocurrencia de agua subterránea ya que actúa como fuente de recarga en un acuífero fracturado, además de ser el impulsor en la hidrología (Ettazarini, 2007).

La FAO, describe su importancia dado que al momento de entrar en saturación el suelo, el agua empieza a infiltrarse a través de grietas o fisuras gracias a la gravedad, hasta encontrarse con una capa impermeable, que permitirá su acumulación.

El mapa se preparó usando la herramienta IDW Interpolation (Ponderación de Distancia Inversa) de ArcGis 10.5, usando la estación más cercana a la zona de estudio, llamada Estación Zaruma (Ayele A, F., et al, 2014).

Geología (Litología).-

Según Shaban et al (2006) la litología es uno de los parámetros más importantes para la búsqueda de agua subterránea, dado que controla la percolación del flujo del agua. Este parámetro es usado para reducir la incertidumbre al momento de determinar la densidad de drenaje y densidad de lineamientos. Para corroborar la litología de la microcuenca se usó el mapa geológico de Zaruma de 1:25000.

Las rocas ígneas por sí mismas no poseen un gran potencial para albergar agua subterránea, pero existen condiciones estructurales que permiten dicho proceso, tal es el caso de las fisuras y de las grietas en las rocas. Además los acuíferos de Zaruma se caracterizan por ser libres y por recargarse gracias al fracturamiento.

Para el análisis de este factor se descargaron los archivos en formato shape del mapa geológico, publicados por el INIGEMM. Esta información fue revisada y validada, elaborándose el mapa base correspondiente.

Densidad de drenaje.-

La densidad de drenaje es una función inversamente proporcional a la permeabilidad la cual juega también un papel importante en la infiltración de agua en el suelo, además de la litología, la pendiente y la capacidad de almacenar la lluvia, por lo cual también es un parámetro hidrogeológico importante (Argaz, A., 2019).

La densidad de drenaje está dada por el radio de la longitud total de todos los órdenes de los ríos por unidad de área y el mapa se obtuvo descargando las cartas topográficas del IGM (Instituto General Militar) halladas en el geoportal, creando y calculando a través de la herramienta Archydro: Density Line (Singh et al. 2014).

Pendiente

Según Madrucci et al, 2008, las pendientes que tengan 35° de inclinación en adelante pueden tener restricciones en la ocurrencia de agua subterránea, a diferencia de aquellas zonas cuyas áreas son más planas e indican la idoneidad de encontrar agua subterránea, ya que al ser lenta la escorrentía superficial, da tiempo a poder filtrarse en el suelo, por lo cual se convierte la gradiente de pendiente en un factor importante o necesario en este tipo de estudios, ya que influye directamente en dicha acumulación (Senanayake I.P., et al; 2014).

Este mapa se elaboró descargando archivos shape de la plataforma del IGM: Cartografía de Libre Acceso escala 50K, con la finalidad de crear un Modelo Digital del Terreno (DEM); por sus siglas en inglés; para luego proceder a usarla herramienta Slope del programa Arcgis y realizar el método de interpolación lineal, de tal forma que el resultado final sería la clasificación de la pendiente según el ángulo de inclinación (Murthy, 2009.; Gumma M.K & Pavelic P., 2012.; Manap, 2012.; Venkatesmaran & Ayyandurai, 2015.; Ibrahim-Bathis & Ahmed, 2015.; Argaz A. et al, 2019).

Permeabilidad e Infiltración de agua en el suelo.

Generalmente la permeabilidad es directamente proporcional a la porosidad efectiva del suelo. Los niveles bajos de recarga de agua subterránea se dan en terrenos con pendientes abruptas, cuyo flujo del agua se descarga fácilmente, con un menor tiempo de infiltración. El valor de la permeabilidad va a estar dado por factores como el tamaño del grano, forma, estructura. La absorción de agua en suelos arcillosos puede ser identificada como el factor que más influye para la permeabilidad del suelo (Punmia et al, 2005).

La infiltración es el paso o movimiento vertical del agua llegando hasta capas profundas en el suelo, por lo cual es un factor que ha sido bien estudiado ya que cumple un papel primordial en procesos relacionados a la escorrentía, (Alvarado, C., et al., 2016) como una respuesta al factor disparador como lo es la precipitación. Por tanto la velocidad de infiltración permitirá conocer la cantidad de escorrentía superficial e incluso la profunda (Vélez, M., 2002).

Los factores que afectan la velocidad de infiltración son la textura, compactación, contenido de humedad, materia orgánica, entre otras (USDA, 1998).

El mapa de Infiltración se realizó mediante el procesamiento y cálculo de los datos de campo y a través de la herramienta IDW de Arcgis, se procede a interpolar los resultados.

Textura del suelo

Es un factor que influye en la ocurrencia y recarga de agua subterránea ya que se encuentra estrechamente relacionado con la capacidad de infiltración y permeabilidad de los suelos, en dependencia del tamaño de las partículas presentes (Kakish, K., et al, 2017).

Se espera que los suelos que tengan una textura media, tales como franco, franco arenoso y arenoso tengan una mayor capacidad de infiltración y por ende capacidad de almacenar agua subterránea, los suelos de textura fina como arcillosos y limosos, operan como un suelo sello que no permite filtrar todo el agua al interior del suelo, aumentando la escorrentía superficial, ya que este tipo de suelo a pesar de retener grandes cantidades de agua, no permite

el movimiento de este recurso dentro del mismo, dando como resultado la saturación del suelo (Kakish, K., et al, 2017).

El mapa Textura de suelo se basó en los ensayos realizados en el laboratorio y luego verificados en los estudios de caracterización de Suelos del Ecuador, datos cartográficos publicados por el Sistema Nacional de Información (SNI) SIGTIERRAS.

Uso de suelo

Al igual que los otros parámetros, el uso de suelos, juega un papel importante para la ocurrencia de agua subterránea. (Leduc, C., et al, 2001)

Para realizar los mapas de este parámetro se usaron imágenes Landsat 8 pancromáticas, cuya combinación permite realizar análisis visuales de las imágenes y así poder discriminar y distinguir ciertas coberturas de otras. El análisis visual de estas imágenes se puede realizar con las composiciones RGB, que corresponden por sus siglas en inglés a 3 bandas con colores (red, green, blue) que al combinarlas, crean una gama de colores que permiten realizar las interpretaciones (Fernández-Coopel, I., et al).

Esto permitió determinar los diferentes usos del territorio del suelo, tales como: Actividad minera, agrícola y otros.

Asignación de pesos a las variables

Los pesos fueron asignados según criterio de expertos, entre los valores asignados, oscilan del 1 hasta el 9 (Manap et al, 2013, Shashank Shekhar et al, 2014, Macas-Espinoza et al., 2017); de acuerdo al número de variables se establece un Índice de Consistencia (Ver Tabla N° 2), el cual, a través del Proceso Jerárquico Analítico se pueden jerarquizar estos valores por medio del método de Saaty, 1980. Para esto se realiza una matriz con las variables a utilizar, obedeciendo la equidad, en donde P_i es la prioridad de la alternativa:

$$a_{ij} = \frac{P_i}{P_j} \quad (\text{Eq. 1})$$

El método AHP de Saaty, considera armar una matriz cuadrada A para comparar n criterios (litología, precipitaciones, geomorfología, permeabilidad, geología estructural, densidad de drenaje, pendientes) en la cual todas las comparaciones realizadas deben obedecer a la Eq. 1

$$A = \begin{pmatrix} \frac{P1}{P1} & \frac{P1}{Pj} & \frac{P1}{Pn} \\ \frac{Pi}{P1} & 1 & \frac{Pi}{Pn} \\ \frac{Pn}{P1} & \frac{Pn}{Pj} & \frac{Pn}{Pn} \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 2})$$

Luego se realiza una suma de los elementos j , en donde todos los elementos de la matriz realizada deben ser sumados, lo cual da la siguiente fórmula:

$$\frac{\sum_{i=1}^n Pi}{Pj} \quad (\text{Eq. 3})$$

A continuación se hace una normalización de la columna, este valor es calculado dividiendo la comparación hecha en la matriz principal por la Ecuación 3.

$$\frac{Pi}{\sum_{i=1}^n Pi} \quad (\text{Eq. 4})$$

El siguiente paso es realizar el tipo/peso de la fila i , en donde este peso es el promedio de los elementos de la Eq. 4.

$$Wi = \left(\frac{Pi}{\sum_{i=1}^n Pi} + \dots + \frac{Pi}{\sum_{i=1}^n Pi} \right) * \frac{1}{n} \quad (\text{Eq. 5})$$

Para poder verificar la validez de los pesos normalizados, se requiere calcular la relación de consistencia (CR) cuya ecuación es:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{Eq. 6})$$

CI= Índice de consistencia

RI= Índice aleatorio de consistencia que dependerá del orden de la matriz (número de criterios) *Ver Tabla N°2*

(Ayele, A., et al, 2014, Macas, V., et al, 2018., Argaz, A., et al, 2019)

Tabla 2: Índice aleatorio de consistencia de Saaty 1980, para diferentes valores de n

<i>N</i>	<i>RI</i>
1	0
2	0
3	0,58
4	0,89
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49

Fuente: Ayele, A., et al, 2014.

Para determinar el Índice de Consistencia (CI) Saaty proporcionó una medida de desviación o grado de consistencia, el cual se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (\text{Eq. 7})$$

Según Saaty (1980), recomienda que aquellas matrices cuyo CR sea >0,1, los valores asignados en la matriz de comparación debe ser juzgados nuevamente, es decir, necesitan ser revaluados y reconsiderados, por lo cual el proceso se debe repetir hasta obtener un CR <0,1 (Ayele A., et al., 2014).

Combinación de bandas de imágenes satelitales Landsat 8

Las 8 bandas se pueden combinar entre ellas para generar como resultado final una imagen en color real o falso color, en dependencia del número de bandas que se escoja de acuerdo a los trabajos que se realicen. Las bandas que se pueden combinar son máximo 3.

Tenemos 11 tipos de banda las cuales son detalladas a continuación:

Tabla 3: Bandas de imágenes satelitales Landsat 8

BANDAS	LONGITUD DE ONDA	RESOLUCION
BANDA 1–Coastal aerosol	0.43-0.45	30
BANDA 2- Azul	0.45-0.51	30
BANDA 3- Verde	0.53-0.59	30
BANDA 4- Rojo	0.64-0.67	30
BANDA 5	0.85-0.88	30
BANDA 6	1.57-1.65	30
BANDA 7	2.11-2.99	30
BANDA 8	0.50-0.68	15
BANDA 9	1-36-1.38	30
BANDA 10	10.60-11.19	100
BANDA 11	11.50-12.51	100

(Fuente: Alonso, D., 2019)

La combinación de bandas usada para este trabajo de investigación fueron las 5, 6, 2, para poder representar mediante colores los lugares más óptimos de encontrar agua y que acompañado de la verificación en campo, forma un método muy recomendable para la búsqueda de agua subterránea.

Construcción del Mapa de Potencial Hidrogeológico para la ocurrencia de agua subterránea.

Después de calcular los pesos para las capas analizadas, en este caso 7, se procede a generar un mapa de potencial hidrogeológico de la microcuenca Zaruma Urcu, usando el método de Combinación Lineal Ponderada (WLC) (Malczewski, 1999) lo cual requiere o implica multiplicar cada valor de la capa por el peso de influencia calculado con anterioridad.

Las zonas de ocurrencia de agua subterránea fueron analizadas a través del Índice de Potencial de Agua Subterránea (GWPI) por sus siglas en inglés (Andualet T.G., et al, 2019), cuya fórmula es la siguiente:

$$GWPI = \sum_{n=1}^7 Wi * Xi$$

Fuente: (Argaz, A., et al, 2019)

Dónde: W_i es el peso asignado a cada capa temática y X_i es el potencial de ocurrencia de agua subterránea, asignado a cada subclase de cada una de las capas temáticas.

Se agregan los valores de cada celda resultante para generar archivos ráster de salida que constituyen las áreas con potencial. Los valores de suma más altos representan un mayor potencial de ocurrencia para agua subterránea. Este método WLC se realiza usando la herramienta Calculadora Ráster en el software ArcGIS 10.5.

El resultado de este proceso se reclasificó en 4 rangos potenciales nombrados de la siguiente manera: Excelente, Bueno, Malo, Muy Malo.

CAPITULO IV

Resultados y Discusión

Ensayo de Humedad Natural

A continuación se detallan cada uno de los puntos de muestreo y aplicación de los ensayos realizados en el campo.

Ensayos de suelo con el auger:

Punto 1

Perfil: EC/ZAR- 001

X: 653634

Y: 9591916

Z: 1080 msnm

El muestreo con el auger alcanzó una profundidad de 60 cm ya que se encontró material rocoso que impidió el avance del equipo (Ver Fig. 12). Se recogieron 4 muestras de suelo en este perfil, debidamente empaquetadas en las fundas Ziploc, a las cuales se les realizó el análisis de humedad natural. Los resultados se observan en la Tabla 4.



Fig.12: Muestreo del perfil 1 con auger (Villacis, K., 2020).

Tabla 4: Ensayo de Humedad Natural a cada muestra del Perfil 1 (Villacís, K., 2020)

Muestra	P1
Abscisa	0-15 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	56,2
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	51,35
Peso del Agua contenida	4,85
Peso del Frasco	31,4
Peso del suelo Seco	19,95
Contenido de Humedad (%)	24,31077694

Muestra	P1
Abscisa	15-30 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	56,95
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	52,34
Peso del Agua contenida	4,61
Peso del Frasco	31,91
Peso del suelo Seco	20,43
Contenido de Humedad (%)	22,5648556

Muestra	P1
Abscisa	30-45 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	56,64
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	52,45
Peso del Agua contenida	4,19
Peso del Frasco	31,48
Peso del suelo Seco	20,97
Contenido de Humedad (%)	19,98092513

Muestra	P1
Abscisa	45-60 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	59,05
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	50,35
Peso del Agua contenida	8,7
Peso del Frasco	31,77
Peso del suelo Seco	18,58
Contenido de Humedad (%)	46,82454252

Punto 2

Perfil EC/ZAR- 002

X: 652362

Y: 9591655

Z: 934 msnm

El muestreo alcanzó una profundidad de 84 cm. Se recogieron 3 muestras de suelo en este punto (Fig. 13), notándose un cambio de color entre cada una de ellas, a las cuales se les determinó la humedad natural (Tabla 5)

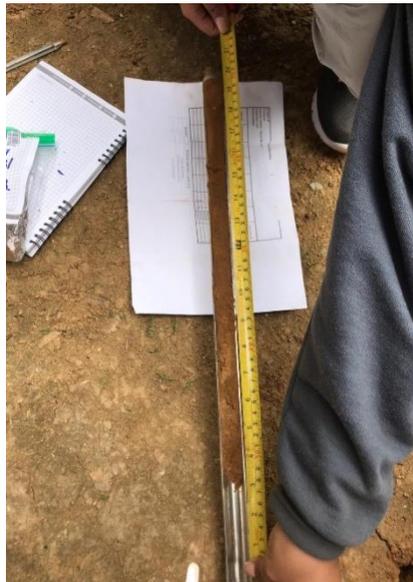


Fig. 13: Muestreo del perfil 2 con auger. (Villacis, K., 2020)

Tabla 5: Ensayo de Humedad Natural a cada muestra del Perfil 2 (Villacís, K., 2020)

Muestra	P2
Abscisa	0-30 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	56,183
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	51,94
Peso del Agua contenida	4,243
Peso del Frasco	31,88
Peso del suelo Seco	20,06
Contenido de Humedad (%)	21,15154536

Muestra	P2
Abscisa	30-60 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	52,02
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	47,11
Peso del Agua contenida	4,91
Peso del Frasco	31,59
Peso del suelo Seco	15,52
Contenido de Humedad (%)	31,63659794

Muestra	P2
Abscisa	60-90 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	54,11
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	48,77
Peso del Agua contenida	5,34
Peso del Frasco	31,4
Peso del suelo Seco	17,37
Contenido de Humedad (%)	30,74265976

Punto 3

Perfil EC/ZAR- 003

X: 653908

Y: 9592531

Z: 1300 msnm

Se alcanzó una profundidad de 1 metro llegando hasta el Horizonte B. Se recogieron 3 muestras de suelo a los cuales se les realizó el ensayo de humedad natural, los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Ensayo de Humedad Natural en cada muestra del Perfil 3 (Villacís, K., 2020).

Muestra	P3
Abscisa	0-23 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	55,58
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	50,76
Peso del Agua contenida	4,82
Peso del Frasco	31,48
Peso del suelo Seco	19,28
Contenido de Humedad (%)	25

Muestra	P3
Abscisa	23-60 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	58,4
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	52,93
Peso del Agua contenida	5,47
Peso del Frasco	31,91
Peso del suelo Seco	21,02
Contenido de Humedad (%)	26,02283539

Muestra	P3
Abscisa	60-100 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	58,94
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	53,28
Peso del Agua contenida	5,66
Peso del Frasco	31,59
Peso del suelo Seco	21,69
Contenido de Humedad (%)	26,09497464

Punto 4

Perfil EC/ZAR- 004

X: 653533

Y: 9592911

Z: 1242 msnm

Se recogieron 3 muestras, al pasar los 15 cm de espesor en la perforación el color del suelo cambió a negro hasta los 45 cm, a partir de esa profundidad se encontraron partículas de rocas que impedían seguir (Fig. 14). Los resultados de humedad natural se muestran en la Tabla N° 7.



Fig. 14: Muestreo del perfil 4 con auger (Villacis, K., 2020).

Tabla 7: Ensayo de Humedad Natural a cada una de las muestras del Perfil 4
(Villacís, K., 2020)

Muestra	P4
Abscisa	0-15 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	68,85
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	61,36
Peso del Agua contenida	7,49
Peso del Frasco	31,88
Peso del suelo Seco	29,48
Contenido de Humedad (%)	25,40705563

Muestra	P4
Abscisa	15-30 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	61,85
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	52,55
Peso del Agua contenida	9,3
Peso del Frasco	31,4
Peso del suelo Seco	21,15
Contenido de Humedad (%)	43,97163121

Muestra	P4
Abscisa	30-45 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	67,64
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	58,451
Peso del Agua contenida	9,189
Peso del Frasco	31,77
Peso del suelo Seco	26,681
Contenido de Humedad (%)	34,44023837

Punto 5

Perfil EC/ZAR- 005

X: 653181

Y: 9593331

Z: 1223 msnm

La profundidad alcanzada en este perfil fue de 55 cm en donde se recogieron 4 muestras de suelo, alcanzando el horizonte B y C (Fig. 15). Los resultados de análisis de humedad natural se observan en la Tabla 8.



Fig. 15: Muestreo del Perfil 5 con auger (Villacis, K., 2020).

Tabla 8: Ensayo de Humedad Natural en cada una de las muestras del Perfil 5 (Villacís, K., 2020)

Muestra	P5
Abscisa	0-15 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	49,4
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	44,8
Peso del Agua contenida	4,6
Peso del Frasco	31,88
Peso del suelo Seco	12,92
Contenido de Humedad (%)	35,60371517

Muestra	P5
Abscisa	15-30 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	51,38
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	47,5
Peso del Agua contenida	3,88
Peso del Frasco	31,77
Peso del suelo Seco	15,73
Contenido de Humedad (%)	24,66624285

Muestra	P5
Abscisa	30-45 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	52,29
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	47,6
Peso del Agua contenida	4,69
Peso del Frasco	31,4
Peso del suelo Seco	16,2
Contenido de Humedad (%)	28,95061728

Muestra	P5
Abscisa	45-55 CM
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	54,4
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	49,91
Peso del Agua contenida	4,49
Peso del Frasco	31,91
Peso del suelo Seco	18
Contenido de Humedad (%)	24,94444444

Punto 6

Perfil EC/ZAR- 006

X: 652856

Y: 9591302

Z: 884 msnm

Esta muestra fue tomada desde una terraza aluvial, con un espesor de 95 cm, en la parte superior de donde se tomó la muestra, se observan rocas redondeadas con un espesor de 90 cm y suelo residual. Se encontraron vetillas de cuarzo con un rumbo de 41 NS y una potencia de 0,5 m (Ver Fig. 16). Los resultados de humedad se observan en la Tabla 9.

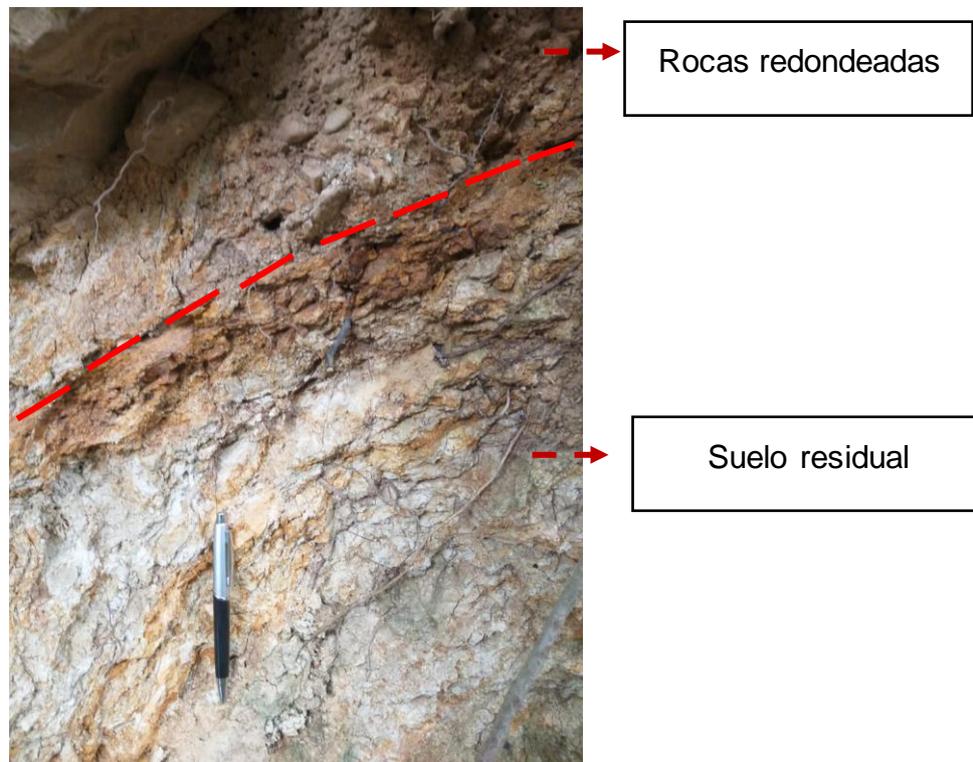


Fig. 16: Muestreo del Perfil 6 con auger (Villacis, K., 2020).

Tabla 9: Ensayo de Humedad Natural en cada una de las muestras del Perfil 6 (Villacís, K., 2020).

Muestra	P6
Abscisa	0-95 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	58,09
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	55,2
Peso del Agua contenida	2,89
Peso del Frasco	31,88
Peso del suelo Seco	23,32
Contenido de Humedad (%)	12,39279588

Punto 7

Perfil EC/ZAR- 007

X: 652844

Y: 9592794

Z: 1150 msnm

Se obtuvieron 4 muestras de suelo de un talud, cuyos perfiles eran claramente visibles (Fig. 17). Los resultados de humedad de cada una de las muestras se detallan a continuación en la siguiente tabla:

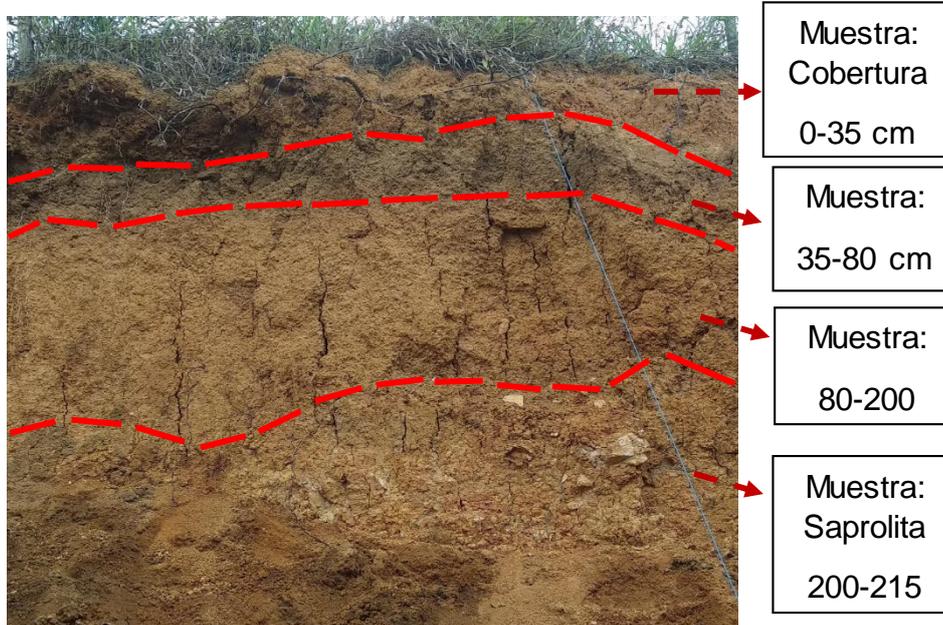


Fig. 17: Muestreo del Perfil 7 con auger. (Villacís, K., 2020)

Tabla 10: Ensayo de Humedad Natural a cada una de las muestras del Perfil 7 (Villacís, K., 2020).

Muestra	P7
Abscisa	0-35 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	68,62
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	60,5
Peso del Agua contenida	8,12
Peso del Frasco	31,48
Peso del suelo Seco	29,02
Contenido de Humedad (%)	27,98070296

Muestra	P7
Abscisa	35-80 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	71,901
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	67,9
Peso del Agua contenida	4,001
Peso del Frasco	31,59
Peso del suelo Seco	36,31
Contenido de Humedad (%)	11,01900303

Muestra	P7
Abscisa	80-200 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	64,64
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	61,9
Peso del Agua contenida	2,74
Peso del Frasco	31,91
Peso del suelo Seco	29,99
Contenido de Humedad (%)	9,136378793

Muestra	P7
Abscisa	200-215 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	67,43
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	59,45
Peso del Agua contenida	7,98
Peso del Frasco	31,88
Peso del suelo Seco	27,57
Contenido de Humedad (%)	28,9445049

Punto 8

Perfil EC/ZAR-008

X: 652714

Y: 9591844

Z: 972

En este punto se obtuvo una sola muestra debido a que mientras se iba profundizando con el auger, se encontraban rocas que no permitían el paso de la herramienta. La profundidad que se alcanzó fue de 33 cm.

El resultado de humedad para este perfil se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11: Ensayo de Humedad Natural 8 (Villacís, K., 2020).

Muestra	P8
Abscisa	0-33
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	51,04
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	47,42
Peso del Agua contenida	3,62
Peso del Frasco	31,4
Peso del suelo Seco	16,02
Contenido de Humedad (%)	22,59675406

Punto 9

Perfil EC/ZAR-009

X: 652746

Y: 9593020

Z: 1182

En este perfil, se recolectaron 5 muestras de suelo alcanzando una profundidad de 75 cm (Fig. 18), a cada una de éstas muestras se le realizó el análisis de humedad, dando como resultados los siguientes datos, mostrados en la Tabla 12.



Fig. 18: Muestreo del Perfil 9 con auger. (Villacis, K., 2020).

Tabla 12: Ensayo de Humedad Natural a cada una de las muestras del Perfil 9 (Villacis, K., 2020)

Muestra	P9
Abscisa	0-15 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	60,44
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	53,51
Peso del Agua contenida	6,93
Peso del Frasco	31,77
Peso del suelo Seco	21,74
Contenido de Humedad (%)	31,87672493

Muestra	P9
Abscisa	15-30 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	63,235
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	56,96
Peso del Agua contenida	6,275
Peso del Frasco	31,91
Peso del suelo Seco	25,05
Contenido de Humedad (%)	25,0499002

Muestra	P9
Abscisa	30-45
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	63,44
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	55,51
Peso del Agua contenida	7,93
Peso del Frasco	31,88
Peso del suelo Seco	23,63
Contenido de Humedad (%)	33,55903512

Muestra	P9
Abscisa	45-60 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	65,69
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	58,35
Peso del Agua contenida	7,34
Peso del Frasco	31,4
Peso del suelo Seco	26,95
Contenido de Humedad (%)	27,23562152

Muestra	P9
Abscisa	60-75
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	68,32
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	60
Peso del Agua contenida	8,32
Peso del Frasco	31,77
Peso del suelo Seco	28,23
Contenido de Humedad (%)	29,4721927

Punto 10

Perfil EC/ZAR-010

X: 652668

Y: 9592403

Z: 1131 msnm

Éste perfil fue realizado en el Cerro Zaruma Urcu, en un talud cuyos perfiles se notaban con claridad (Fig. 19). Se recogieron 3 muestras para su posterior análisis de humedad natural (Tabla 13), alcanzando una profundidad de 1,5 m.

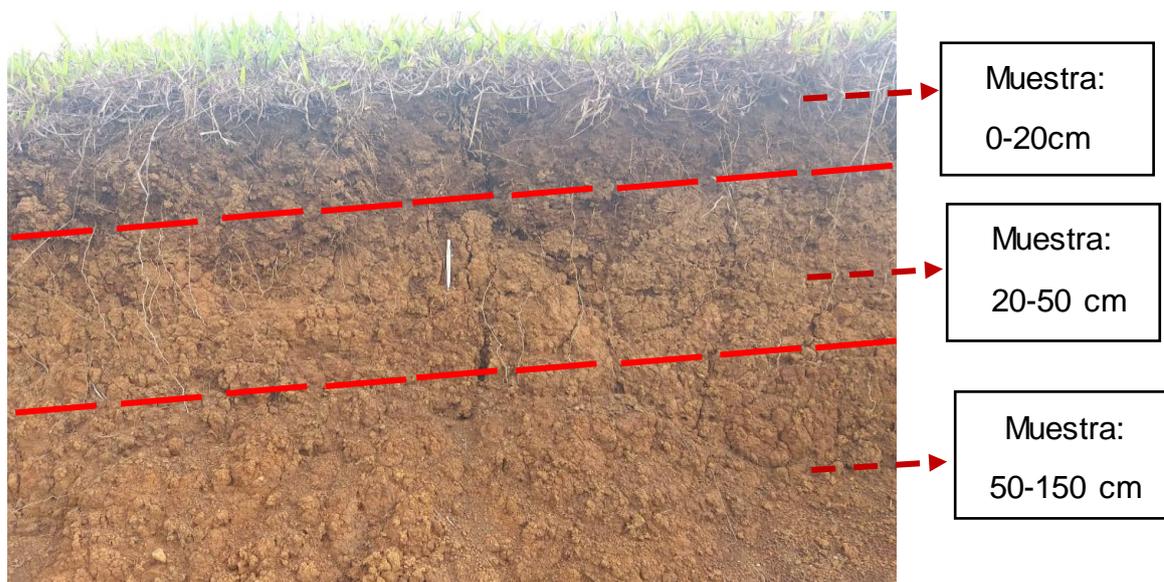


Fig.19: Muestreo del Perfil 10 con auger (Villacis, K., 2020).

Tabla 13: Ensayo de Humedad Natural 10 (Villacís, K., 2020)

Muestra	P10
Abscisa	0-20 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	64
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	56,743
Peso del Agua contenida	7,257
Peso del Frasco	31,88
Peso del suelo Seco	24,863
Contenido de Humedad (%)	29,18794997

Muestra	P10
Abscisa	20-50 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	78,4
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	74,04
Peso del Agua contenida	4,36
Peso del Frasco	31,91
Peso del suelo Seco	42,13
Contenido de Humedad (%)	10,34892001

Muestra	P10
Abscisa	50-150 CM
	PESO (gr)
Peso del Frasco+Peso Suelo Húmedo	68,69
Peso del Frasco+Peso Suelo Seco	60,68
Peso del Agua contenida	8,01
Peso del Frasco	31,77
Peso del suelo Seco	28,91
Contenido de Humedad (%)	27,70667589

Ensayo de Textura de Suelo

El análisis de textura se puede realizar en dos etapas, ya sea en campo o en laboratorio, en este caso, se lo realizó en laboratorio usando el método organoléptico, que consiste en humedecer la muestra y sentir los agregados de arena - limo – arcilla y distinguirlos de forma manual (Ibáñez, S., Moreno-Ramón, H., 2010).

Para el ensayo de textura de suelo se usaron las muestras que correspondían al Horizonte B, dado que este horizonte se caracteriza por presentar características acumulativas y además de que en un perfil del subsuelo, se encuentra dentro de la zona no saturada, ubicada entre la superficie del terreno y la capa freática (Collazo, M., & Montaña, J., 2012).

Las muestras analizadas para este trabajo fueron 10, cuyos resultados se describen a continuación:

PUNTO 1: En esta textura Franco, la sensación al tacto es suave, con contenidos iguales de partículas, forma una cinta de más de 15 cm sin romperse o agrietarse por completo, tal como se observa en la Fig. 20.

PUNTO	P1		
COORDENADAS	X: 653634	Y: 9591916	Z:1080 msnm
ABSCISA	45-60 cm		
TEXTURA	FRANCA		
FOTOGRAFIA			

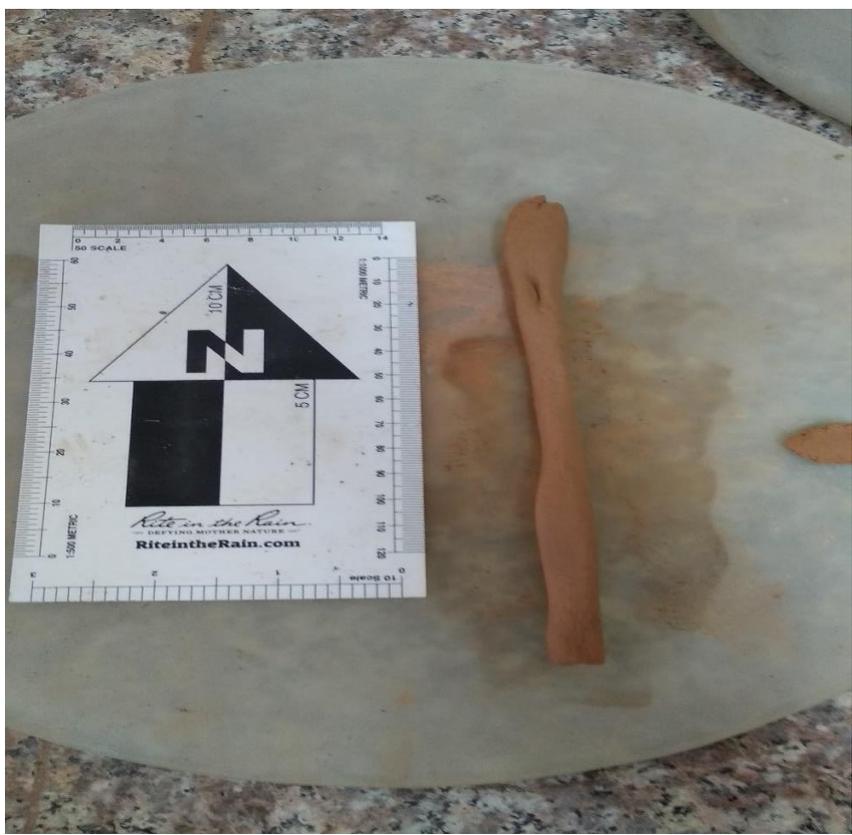


Fig. 20: Textura Franca (Villacís, K., 2020)

PUNTO 2: La textura Franco Arenosa, se rompe fácilmente en seco y cuando se humedece, se logra formar una bola que al principio se siente suave, pero al seguir frotándola, predomina una sensación más áspera. Al formar una cinta se quiebra cuando alcanza los 3 cm de largo (Fig. 21).

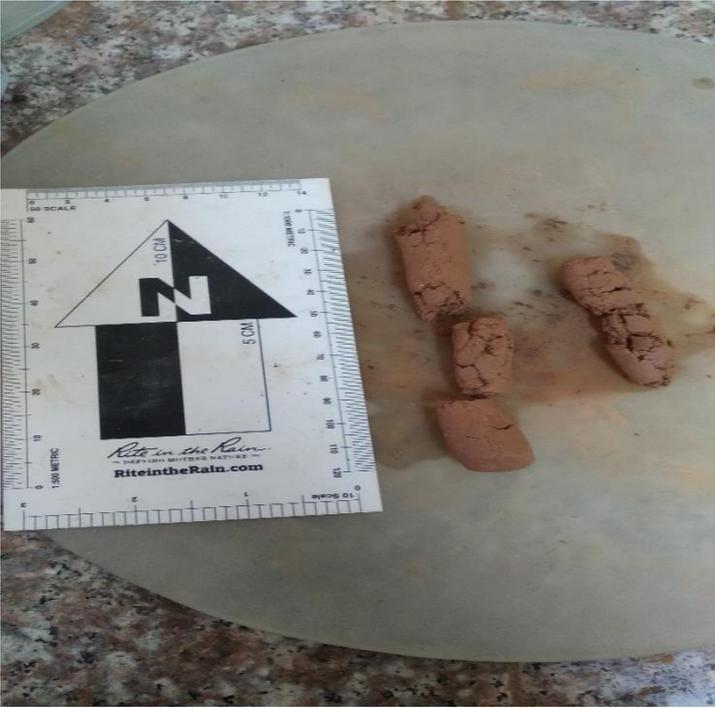
PUNTO	P2
COORDENADAS	X: 652362 Y: 9591655 Z: 934 msnm
ABSCISA	60-90 cm
TEXTURA	FRANCO ARENOSA
FOTOGRAFIA	
	

Fig. 21 Textura Franco Arenosa (Villacís, K., 2020)

PUNTO 3: Esta muestra puede formar una bola moldeable sin llegar a romperse, la cinta se puede formar haciendo presión hasta alcanzar los 5 cm de largo. La muestra de Textura Franco Arcillo Arenosa, en húmedo, tiene una sensación suave al tacto (Fig. 22)

PUNTO	P3
COORDENADAS	X: 653908 Y: 9592531 Z:1300 msnm
ABSCISA	60-100 cm
TEXTURA	FRANCO ARCILLO ARENOSA
FOTOGRAFÍA	
	

Fig.22: Textura Arcillo Arenosa (Villacís, K., 2020)

PUNTO 4: Esta muestra de textura Franco Arcillo arenosa, puede formar una bola y cinta con facilidad, logra formar una cinta de hasta 5 cm de largo, al tocar y frotar la muestra en húmedo, al tacto, se siente suave (Fig. 23). La muestra presenta un color negro, debido al contenido de materia orgánica, esta muestra se encontró desde los 30-45 cm de profundidad.

PUNTO	P4
COORDENADAS	X: 653533 Y: 9592911 Z:1242 msnm
ABSCISA	30-45 cm
TEXTURA	FRANCO ARCILLO ARENOSA
FOTOGRAFÍA	
	

Fig. 23: Textura Franco Arcillo Arenosa (Villacís, K., 2020)

PUNTO 5: Esta Textura Franco Arcillo Arenosa forma una bola y luego al frotar la muestra en húmedo, se percibe al tacto una sensación suave (Fig. 24). La muestra tiene un color café oscuro.

PUNTO	P5
COORDENADAS	X: 653181 Y: 9593331 Z:1223 msnm
ABSCISA	45-55 cm
TEXTURA	FRANCO ARCILLO ARENOSA
FOTOGRAFÍA	
	

Fig. 24: Textura Arcillo Arenosa (Villacís, K., 2020)

PUNTO 6: La textura Franco Arcillosa, en muestra seca, son agregados o partículas duras y resistentes cuando se las quiere romper y cuando se pulveriza al tocarlo, tiene una sensación áspera. En muestra húmeda, se logra formar una bola moldeable y una cinta que alcanza los 5 cm de longitud, al tacto no es ni suave ni duro (Fig. 25).

PUNTO	P6
COORDENADAS	X: 652856 Y: 9591302 Z: 884 msnm
ABSCISA	0-95 cm (Observación: Terraza Aluvial)
TEXTURA	FRANCO ARCILLOSA
FOTOGRAFIA	
 <p>The photograph shows several soil samples on a light-colored surface. A white data tag with blue handwriting is placed above the samples. The tag contains the following information: 'P6: 652856', '26: 9591302', 'Z: 884 m.', and 'abs: 0+95cm'. To the left of the samples is a ruler and a black and white orientation marker with a compass rose. The ruler has markings in centimeters and millimeters. The orientation marker has a logo and the text 'Rite in the Rain.com'.</p>	

Fig. 25: Textura Franco Arcillosa (Villacís, K., 2020)

PUNTO 7: Al momento de mojar la muestra, ésta puede ser manipulada y formar una bola y una cinta hasta 3 cm de largo, al tacto no se percibe ni suave ni áspero. En muestra seca, los agregados se rompen a una presión moderada.

PUNTO	P7
COORDENADAS	X: 652844 Y: 9592794 Z:1150 msnm
ABSCISA	200-215 cm
TEXTURA	FRANCA
FOTOGRAFÍA	
	

Fig. 26: Textura Franca (Villacís, K., 2020)

PUNTO 8: En la textura Franco Arcillosa se puede formar una cinta de hasta 5 cm de largo y al hacer presión con el pulgar y el índice, la sensación al tacto no es suave ni áspero. En muestra seca, la sensación es un poco áspera por los agregados que contiene el suelo, contenido de arcilla y arena (Fig. 27)

PUNTO	P8
COORDENADAS	X: 652714 Y: 9591844 Z: 972 msnm
ABSCISA	0-33 cm
TEXTURA	FRANCO ARCILLOSA



FOTOGRAFÍA

Fig. 27: Textura Franco Arcillosa (Villacís, K., 2020)

PUNTO 9: Esta textura forma una cinta de más de 5 cm de largo, sin llegar a romperse, la sensación al tacto es muy áspera (Fig. 28)

PUNTO	P9
COORDENADAS	X: 652746 Y: 9593020 Z:1182 msnm
ABSCISA	45-60 cm
TEXTURA	FRANCO ARCILLO ARENOSA
FOTOGRAFIA	
 A photograph showing several reddish-brown, elongated, and slightly curved pieces of soil texture on a light-colored surface. A ruler and a scale are placed next to the samples for size reference. The ruler has markings in centimeters and millimeters. The scale is a white card with a black triangle and the letter 'N' inside, with '10 CM' and '5 CM' markings. The text 'Rite in the Rain' and 'RiteintheRain.com' is visible on the scale. A knife is partially visible in the upper right corner of the photo.	

Fig. 28: Textura Franco Arcillo Arenosa (Villacís, K., 2020)

PUNTO 10: Al humedecer excesivamente el suelo la sensación al tacto al momento de frotarlo entre los dedos, es muy áspera, es decir pertenece a la familia de los suelos finos (Fig. 29)

PUNTO	P10
COORDENADAS	X: 652668 Y: 9592403 Z:1131 msnm
ABSCISA	20-50 cm
TEXTURA	ARCILLOSA ARENOSA
FOTOGRAFIA	
	

Fig. 29: Textura Arcillosa Arenosa (Villacís, K., 2020)

Ensayo de infiltrómetro

La capacidad de infiltración que se mide en mm/h debe ser calculada para tener un conocimiento de la capacidad que tienen los suelos al momento del ingreso del agua. De tal manera que si el aporte de agua superficial es menor a la capacidad de infiltración, da tiempo a la acumulación de escorrentía subterránea.

Dentro de la microcuenca Zaruma Urcu, se realizaron 7 ensayos de infiltrómetro mediante el instrumento llamado "Doble Anillo", cuyos cálculos se realizaron en las tablas de Excel.

PUNTO 1: "EC/ZAR-I001

El ensayo de infiltrómetro de doble anillo, tiene diferentes velocidades de infiltración en dependencia del tiempo en que se demoró en ingresar el agua al suelo. Se calculó el promedio de todas las velocidades resultantes de cada punto de ensayo. Para el Punto 1 el promedio que se obtuvo fue de 477,19 mm/h (Tabla 14), la textura en este punto es arcillosa y a medida que el tiempo avanza, la velocidad de infiltración va disminuyendo debido a que empieza a saturarse el suelo hasta encontrar su punto de equilibrio (Fig. 30).

Tabla 14: Ensayo de Infiltrómetro N° 1 (Villacís, K., 2020)

EC/ZAR-I001 191229	COORDENADAS	X: 652640 Y: 9592185			
Tiempo parcial (min)	Tiempo acumulado (TA) (min)	Lámina infiltrada en el intervalo (mm)	Lámina acumulada (mm)	Velocidad de infiltración acumulada (mm/min)	Velocidad de infiltración (mm/h)
2	2	20	20	10,00	600,00
2	4	19,5	39,5	9,88	585,00
2	6	18,7	58,2	9,70	561,00
2	8	17,6	75,8	9,48	528,00
2	10	16,8	92,6	9,26	504,00
2	12	16,5	109,1	9,09	495,00
2	14	16	125,1	8,94	480,00
2	16	15,7	140,8	8,80	471,00
2	18	15,2	156	8,67	456,00
2	20	14,9	170,9	8,55	447,00
2	22	14,7	185,6	8,44	441,00
2	24	14,5	200,1	8,34	435,00
2	26	14,1	214,2	8,24	423,00
2	28	13,8	228	8,14	414,00
2	30	13,4	241,4	8,05	402,00
2	32	13,1	254,5	7,95	393,00
PROMEDIO					477,19

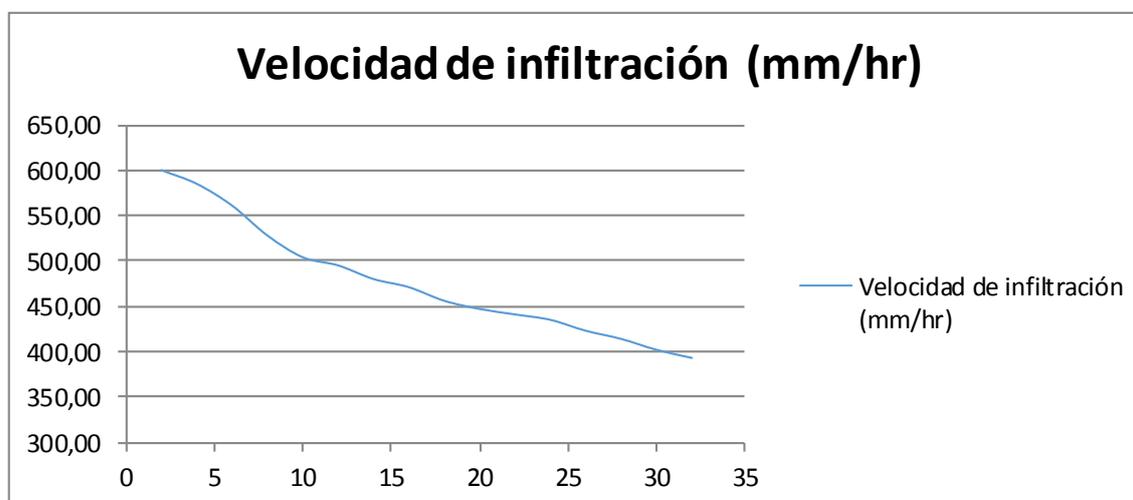


Fig.30: Velocidad de Infiltración vs Tiempo del ensayo N°1 (Villacís, K., 2020)

Punto 2: EC/ZAR-I002

El promedio de la velocidad de infiltración en este punto fue de 292,33 mm/h, durante 18 minutos de ensayo, esta velocidad es menor al punto anterior, debido a que la textura es Franco arcillo-arenosa. Los resultados se muestran en la siguiente Tabla N° 15, con su respectivo análisis de curva. (Fig. 31)

Tabla 15: Ensayo de infiltrómetro N° 2 (Villacís, K., 2020)

EC/ZAR-I002 191229	COORDENADAS	X: 653856 Y: 9592094			
Tiempo parcial (min)	Tiempo acumulado (TA) (min)	Lámina infiltrada en el intervalo (mm)	Lámina acumulada (mm)	Velocidad de infiltración acumulada (mm/min)	Velocidad de infiltración (mm/h)
2	2	20	20	10,00	600,00
2	4	17,3	37,3	9,33	519,00
2	6	13,5	50,8	8,47	405,00
2	8	10,7	61,5	7,69	321,00
2	10	8,5	70	7,00	255,00
2	12	6,6	76,6	6,38	198,00
2	14	4,9	81,5	5,82	147,00
2	16	3,3	84,8	5,30	99,00
2	18	2,9	87,7	4,87	87,00
				PROMEDIO	292,33

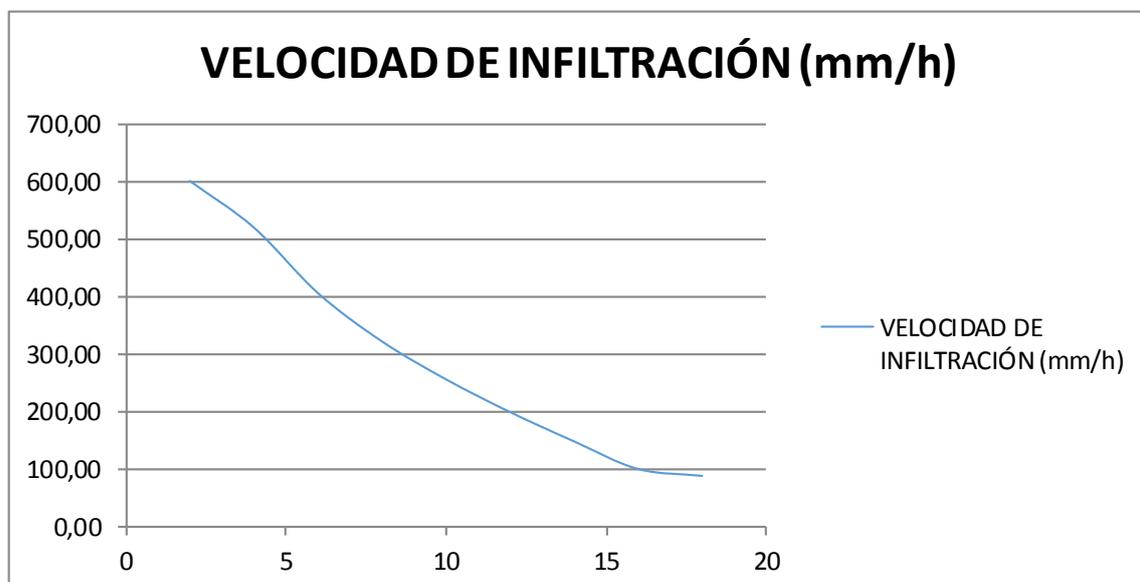


Fig. 31: Velocidad de Infiltración Vs Tiempo del ensayo N°2 (Villacís, K., 2020)

Punto 3: EC/ZAR-I003

En este punto se hicieron dos lecturas, ya que al colocar los 25 cm de agua, el suelo lo absorbía demasiado rápido, debido a que la textura es Franco arcillo-arenosa. El promedio de la velocidad de infiltración fue de 281,45 mm/h, en un lapso de 18 minutos. Los resultados se observan en la Tabla 16 junto a las curvas de infiltración (Fig. 32)

Tabla 16: Ensayo de Infiltrómetro N°3 (Villacís, K., 2020)

EC/ZAR-I003 191229	COORDENADAS	X: 653473 Y: 9592387			
Tiempo parcial (min)	Tiempo acumulado (TA) (min)	Lámina infiltrada en el intervalo (mm)	Lámina acumulada (mm)	Velocidad de infiltración acumulada (mm/min)	Velocidad de infiltración (mm/h)
2	2	25	25	12,50	750,00
2	4	18	43	10,75	540,00
2	6	15	58	9,67	450,00
2	8	12,8	70,8	8,85	384,00
2	10	9,8	80,6	8,06	294,00
2	12	6,5	87,1	7,26	195,00
2	14	6	93,1	6,65	180,00
2	16	4,5	97,6	6,10	135,00
2	18	2,6	100,2	5,57	78,00
2	20	2,5	102,7	5,14	75,00
2	22	0,5	103,2	4,69	15,00
				PROMEDIO	281,45

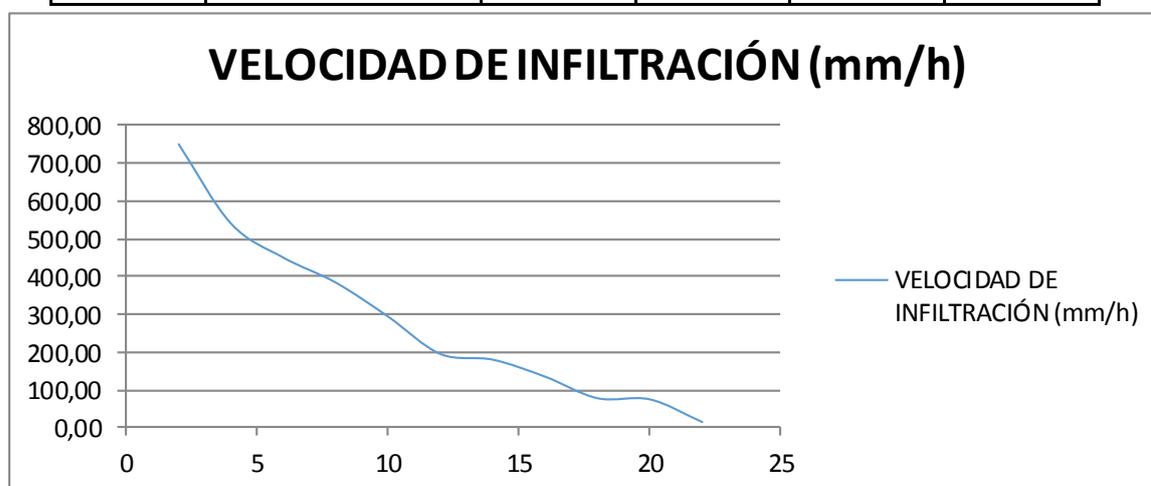


Fig. 32: Velocidad de Infiltración vs Tiempo de infiltrómetro N 3 (Villacís, K., 2020)

Punto 4: EC/ZAR-I004

El promedio de velocidad de infiltración en este punto fue 159 mm/h (Tabla 17), dado que la textura es Franco arcillo-arenosa, al igual que los dos puntos anteriores, los resultados se muestran en la Tabla 16, junto a la curva de infiltración (Fig. 33).

Tabla 17: Ensayo de infiltrómetro N°4 (Villacís, K., 2020)

EC/ZAR-I004 191204	COORDENADAS	X: 654197 Y: 9592366 Z: 1308 msnm			
Tiempo parcial (min)	Tiempo acumulado (TA) (min)	Lámina infiltrada en el intervalo (mm)	Lámina acumulada (mm)	Velocidad de infiltración acumulada (mm/min)	Velocidad de infiltración (mm/h)
2	2	10	10	5,00	300,00
2	4	7,5	17,5	4,38	225,00
2	6	5	22,5	3,75	150,00
2	8	3	25,5	3,19	90,00
2	10	1	26,5	2,65	30,00
				PROMEDIO	159,00

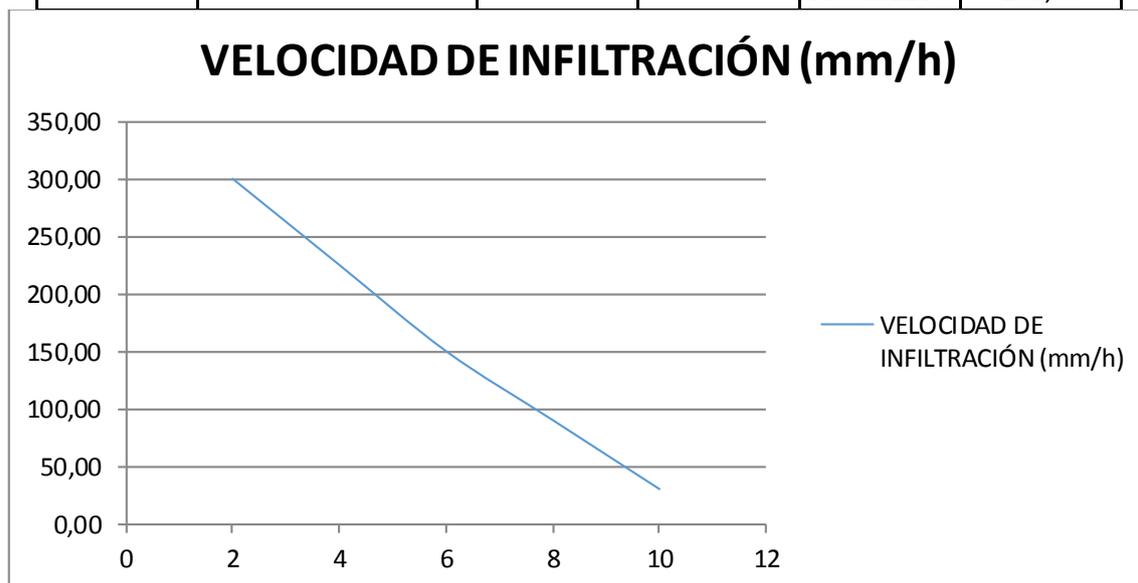


Fig. 33: Velocidad de infiltración Vs Tiempo de infiltrómetro N° 4 (Villacís, K., 2020)

Punto 5: EC/ZAR-I005

El promedio para la velocidad de infiltración en este punto fue de 275,63 mm/h, donde la textura es Franco Arcillosa, los resultados se muestran a continuación en la Tabla 18, junto a la curva de infiltración (Fig. 34).

Tabla 18: Ensayo de Infiltrómetro N° 5 (Villacís, K., 2020)

EC/ZAR-I005 191204	COORDENADAS	X: 652918 Y: 9592159 Z: 1049 msnm			
Tiempo parcial (min)	Tiempo acumulado (TA) (min)	Lámina infiltrada en el intervalo (mm)	Lámina acumulada (mm)	Velocidad de infiltración acumulada (mm/min)	Velocidad de infiltración (mm/h)
2	2	21	21	10,50	630,00
2	4	15	36	9,00	450,00
2	6	12	48	8,00	360,00
2	8	9	57	7,13	270,00
2	10	7	64	6,40	210,00
2	12	5	69	5,75	150,00
2	14	3,5	72,5	5,18	105,00
2	16	1	73,5	4,59	30,00
				PROMEDIO	275,63

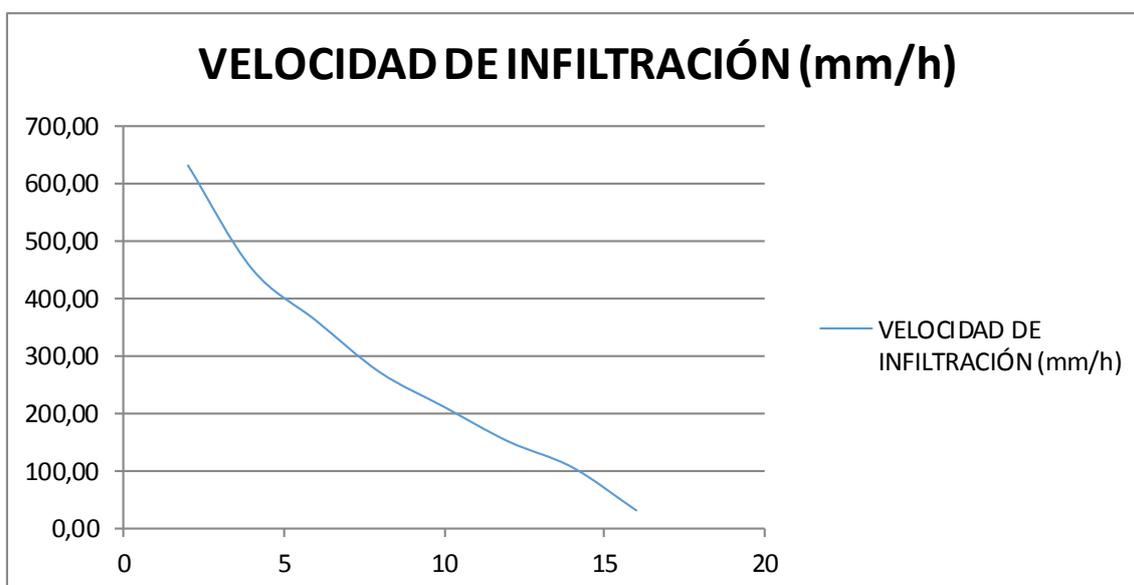


Fig. 34: Velocidad de Infiltración vs Tiempo de infiltrómetro N° 5, (Villacís, K., 2020)

Punto 6: EC/ZAR-I006

La velocidad de infiltración promedio de este punto, fue de 304,29 mm/h que debido a su textura Franco arenosa, la velocidad es mayor al punto anterior y cuyos resultados se muestran en la Tabla 19, con las curvas de infiltración de este ensayo.

Tabla 19: Ensayo de infiltrómetro N° 6 (Villacís, K., 2020)

EC/ZAR-I006 191204	COORDENADAS	X: 652382 Y: 9591820 Z: 956 msnm			
Tiempo parcial (min)	Tiempo acumulado (TA) (min)	Lámina infiltrada en el intervalo (mm)	Lámina acumulada (mm)	Velocidad de infiltración acumulada (mm/min)	Velocidad de infiltración (mm/h)
2	2	20	20	10,00	600,00
2	4	16	36	9,00	480,00
2	6	13	49	8,17	390,00
2	8	10	59	7,38	300,00
2	10	7	66	6,60	210,00
2	12	4	70	5,83	120,00
2	14	1	71	5,07	30,00
				PROMEDIO	304,29

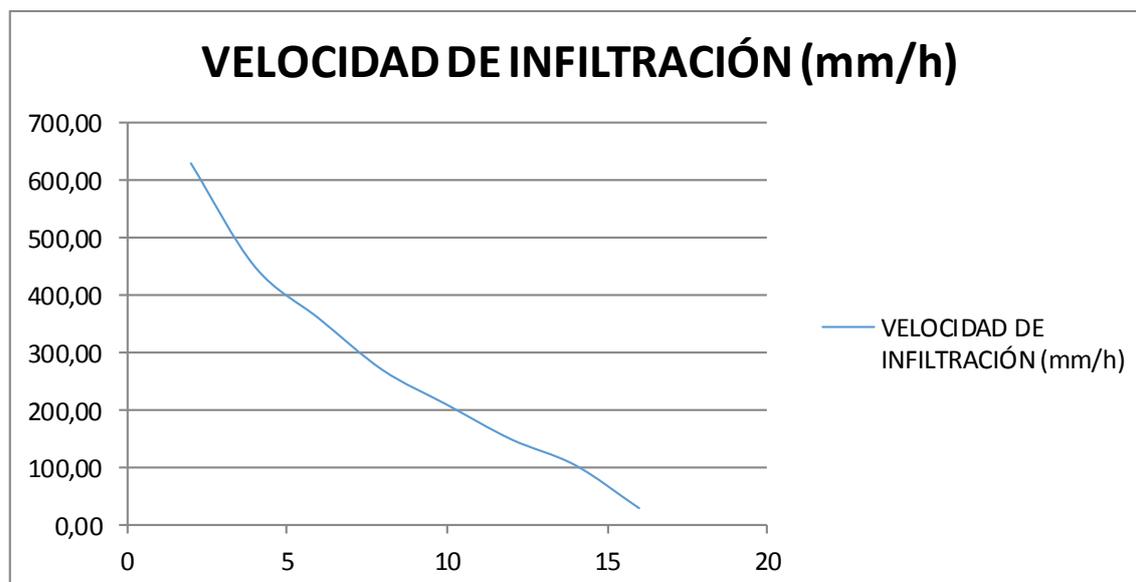


Fig.35: Velocidad de Infiltración vs Tiempo de infiltrómetro N°6, (Villacís, K., 2020)

Punto 7

La velocidad de infiltración en este punto tuvo un promedio de 274,13 mm/h, menor a la anterior dado que la textura en este punto es Franco Arcillosa, debido al tamaño reducido de sus granos la velocidad se reduce, estos resultados se pueden observar en la Tabla 20 y en la curva de infiltración (Fig. 36)

Tabla 20: Ensayo de Infiltrómetro N° 7 (Villacís, K., 2020)

EC/ZAR-I007 191204	COORDENADAS	X: 653261 Y: 9591328 Z: 1000 msnm			
Tiempo parcial (min)	Tiempo acumulado (TA) (min)	Lámina infiltrada en el intervalo (mm)	Lámina acumulada (mm)	Velocidad de infiltración acumulada (mm/min)	Velocidad de infiltración (mm/h)
2	2	20	20	10,00	600,00
2	4	17	37	9,25	510,00
2	6	13,6	50,6	8,43	408,00
2	8	9	59,6	7,45	270,00
2	10	5,5	65,1	6,51	165,00
2	12	4	69,1	5,76	120,00
2	14	3	72,1	5,15	90,00
2	16	1	73,1	4,57	30,00
				PROMEDIO	274,13

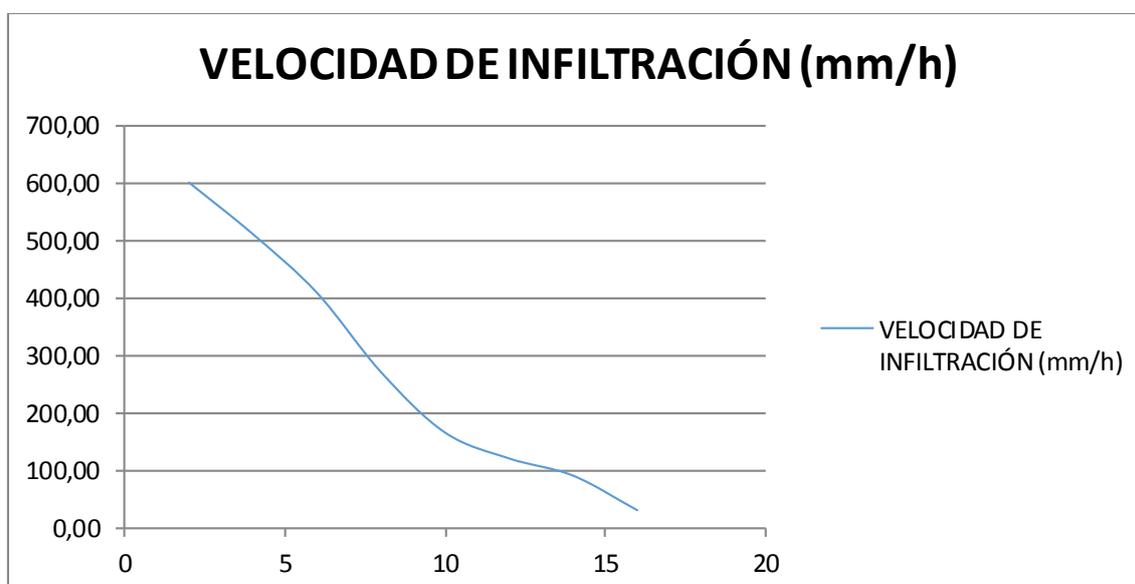


Fig. 36: Velocidad de Infiltración vs Tiempo del infiltrómetro N° 7 (Villacís, K., 2020)

Análisis de Láminas Delgadas

LÁMINA No. RX1-M1-KV001

Análisis macroscópico: La observación macroscópica de la muestra de mano indica que es una roca gris clara, presenta contenido de feldespatos y ferromagnesianos similares, textura hipocristalina y una matriz con similares componentes de los fenocristales.

Estudio microscópico: Textura hipocristalina, los fenocristales presentan una ligera alineación, además existe un dominio de feldespatos (plagioclasas).

PORCENTAJE APROXIMADO DE MINERALES

<i>FENOCRISTALES</i>	60%
Plagioclasas	35%
Hornblenda	15%
Piroxenos	5 %
Opacos	5 %
<i>MATRIZ</i>	40%
Plagioclasas	20%
Hornblendas	8%
Piroxenos	10%
Clorita	2%
TOTAL	100%

Características de los minerales

Plagioclasas: Son los minerales que predominan, se presentan como fenocristales y también en la matriz; en algunas plagioclasas que son de gran tamaño se observan sus maclados polisintéticos, son de formas desarrolladas, sus bordes están limpios. El relieve es moderado, algunos cristales presentan un ángulo de extinción inclinado.

Las plagioclasas se presentan con un porcentaje moderado dentro de la lámina delgada. Estas plagioclasas se encuentran dispersas y son características de magmas intermedios.

Ferromagnesianos: Se observan cristales de hornblendas por su forma y clivaje, se encuentran junto a piroxenos (augitas) los colores de birrefringencia son de segundo orden (colores fuertes), gran parte de los ferromagnesianos están ligeramente alterados a clorita, estos dos ferromagnesianos se han diferenciado por su desarrollo del clivaje.

La roca tiene componentes ferromagnesianos (augitas y hornblendas) algunos están en sus bordes cloritizados. Es compacta, tiene fractura concoidea, presenta pocos minerales nocivos y que pueden provocar reactividad como la clorita.

Nombre de la roca: Por todo lo descrito esta roca se denomina como una Lava Andesita, con dureza alta y con un grado de meteorización bajo.

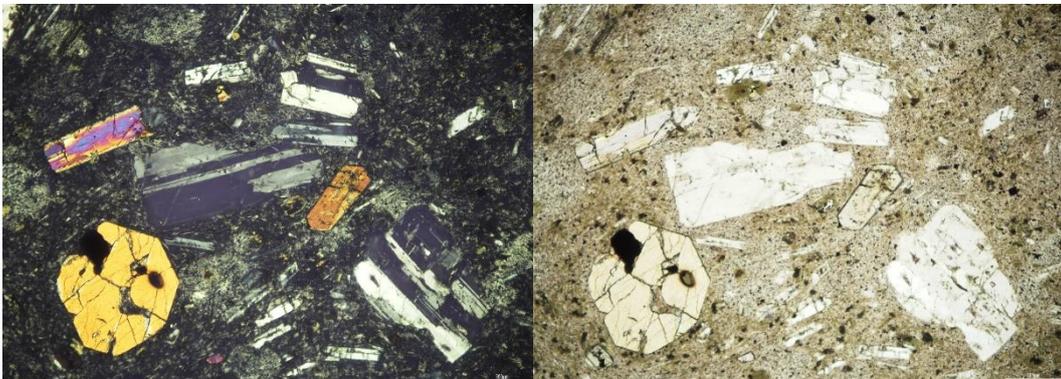


Figura 37: RX1 - M1, Fotografía (Izq.) Nícoles Cruzados y (Der.) Nícoles Paralelos (Villacís, K., 2020)

En la fotografía izquierda, que está en nícoles paralelos, las plagioclasas presentan su respectivo maclado, sus cristales están desarrollados, tienen un tamaño heterogéneo y tienen forma euhédrica y subhédrica, se observan minerales ferromagnesianos como hornblenda y piroxenos.

LÁMINA No. RX2-M2 – KV002

Análisis macroscópico: La muestra de mano tiene un color gris claro, verdoso, presenta concentraciones de minerales de cuarzo, de color blanco. Es una roca fina granular, volcanoclástica, poco cohesiva, algunas partes dentro de la lámina están oxidadas, se observan clastos redondeados a subredondeados.

Estudio microscópico: Textura clástica con detritos andesíticos de textura porfirítica.

PORCENTAJE APROXIMADO DE MINERALES

FENOCRISTALES	75%
Plagioclasas	20%
Cuarzo	15%
Clastos de otras rocas	30%
Clorita	5%
Opacos	5 %
MATRIZ	25%
Plagioclasas	15%
Cuarzo	5 %
Clorita	3%
Opacos	2 %
TOTAL	100%

Características de los minerales

Plagioclasas.- Los pocos minerales están recristalizados, dispersos, son de tamaño pequeño, se identificaron por los maclados polisintéticos presentes, son de formas poco desarrolladas, sus bordes están corroídos. El relieve es moderado, algunos cristales presentan un ángulo extinción.

Cuarzo.- Se unen estableciendo cristales sin formas, son de relieve bajo y de colores grises de primer orden, en la roca se observan vetillas de este mineral.

Clastos de otras rocas.- Se observan pequeños detritos de andesitas basálticas, de color gris oscuro, redondeados a sub-redondeados, cloritizados, dentro de una matriz limosa rica en sílice, algunos clastos angulosos son de cuarcitas silicificadas. Algunos cristales de color verdoso en luz natural son de clorita, tienen su clivaje característico, presentan relieve moderado. Algunos clastos presentan plagioclasas alineadas. Se observan rellenos de cuarzo en las vesículas.

Nombre de la roca: Piroclastos Andesíticos.

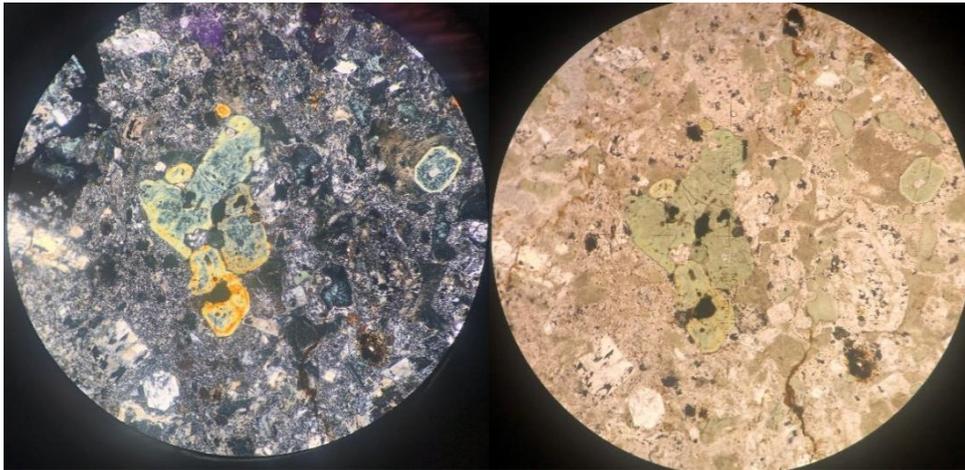


Figura 38: RX2-M2 – KV002, Fotografía (Izq.) Nícoles Cruzado, fotografía (Der.) Nícoles Paralelo. (Villacís, K., 2020).

En la fotografía izquierda se pueden identificar algunos clastos de componentes volcánicos, los de color blanco en su mayoría son de cuarzo, y los restantes corresponden a las plagioclasas, los cristales bien desarrollados son de cuarzo, la roca esta silicificada, los clastos y minerales son de diferente tamaño. Microfotografía en Luz natural (Fotografía derecha) Se observan los minerales incoloros, característicos de cuarzo y plagioclasas, los de color verdoso corresponden a la clorita, se pueden observar minerales opacos (color negro) que pueden tratarse de sulfuros de hierro.

LÁMINA No. RX3-M2-KV003

Análisis macroscópico: Roca gris clara, blanquecina, amarillenta en sus bordes, presenta meteorización, en algunas secciones se observan concentraciones de minerales silíceos.

Estudio microscópico: Textura clástica, presenta formaciones de cuarzo secundario y en otras secciones, pequeñas concentraciones de ferromagnesianos.

PORCENTAJE APROXIMADO DE MINERALES

FENOCRISTALES

Cuarzo	75%
Feldespato	10%
Micas (biotitas)	10%
Opacos	5 %
TOTAL	100%

Características de los minerales

Cuarzo.- Forma cristales perfectos, además presenta detritos subredondeados, visto al microscopio muestra colores grises de primer orden, tiene bajo relieve y se observa que este mineral rellena espacios.

Feldespatos.- Los pocos minerales están recristalizados dispersos y formando disseminaciones, son micrométricos en tamaño. El relieve es moderado y algunos cristales presentan un ángulo extinción.

Pocos cristales de biotitas se han observado con birrefringencia de segundo orden, gran parte de los ferromagnesianos están recristalizados a clorita, dado por sus propiedades ópticas, colores de birrefringencia de segundo orden (colores fuertes) y con relieve alto.

Nombre de la roca: Por tener un alto porcentaje de cuarzo y pocas plagioclasas se denomina a esta muestra Cuarcita, además presenta concentraciones de minerales ferromagnesianos, meteorización baja y contenido de clorita.

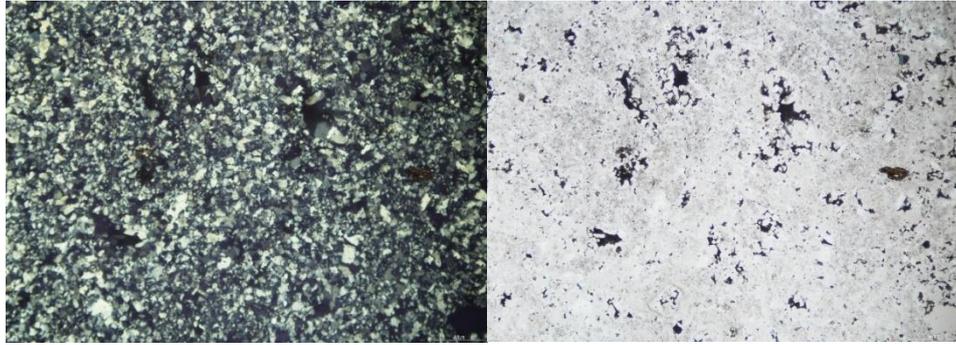


Fig. 39: RX3 - M2-KV003 (Villacís, K., 2020)

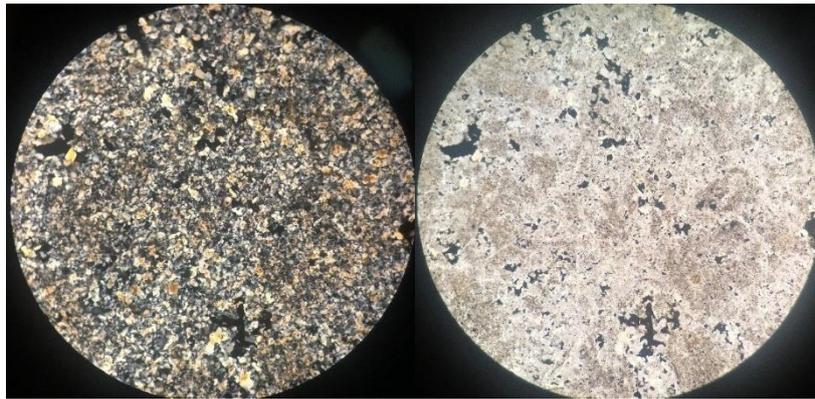


Figura 40: Rx3-M2, Fotografía (Izq.) Nícoles Cruzado, Fotografía (Der.) Nícoles Paralelo.

En la parte central se observa una concentración de ferromagnesianos (biotita) con colores de segundo orden. Se encontró gran contenido de cuarzo por el pleocroísmo que presenta, tiene también poco porcentaje de plagioclasas. En nicoles paralelos se puede ver el cuarzo euhedral, sin color, junto con las plagioclasas, se observan también minerales opacos que se encuentran diseminados rellenando espacios dentro de la matriz.

LÁMINA No. RX4-T12-KV004

Análisis macroscópico: Roca gris clara, extrusiva, en sus bordes se observan procesos de meteorización con presencia de trazas de limonita, las plagioclasas meteorizadas se observan de un color blanco, además presenta vidrio volcánico de color claro y transparente.

Estudio microscópico: La roca tiene una textura clástica, los tamaños de cristales son muy pequeños, micrométricos, de los cuales la plagioclasa es la que mejor se observa.

PORCENTAJE DE MINERALES

FENOCRISTALES	40%
Plagioclasas	30 %
Feldespato	5 %
Clorita	5%
MATRIZ	60%
Plagioclasas	36%
Feldespato K	5 %
Vidrio	15%
Opacos	4 %
TOTAL	100%

Plagioclasas.- No se encuentran bien desarrolladas, tienen maclado polisintético característicos de albitas – oligoclasas, algunas presentan zonación, los bordes están meteorizados y algunas presentan rasgos de alteración. El relieve es moderado y varios cristales muestran un ángulo extinción.

Cuarzo.- Cristales poco desarrollados, de relieve bajo y colores grises de primer orden, se observan acumulaciones.

Detritos de otras rocas: Se observan detritos pequeños de rocas volcánicas ácidas e intermedias con dominio de cristales de plagioclasas (Ver Fig. 40).

Otros minerales: Se observa clorita junto a pocos ferromagnesianos

Nombre de la roca: Riolita tobácea, por tener pocos componentes ferromagnesianos, una matriz vítrea y cantidades considerables de cuarzo

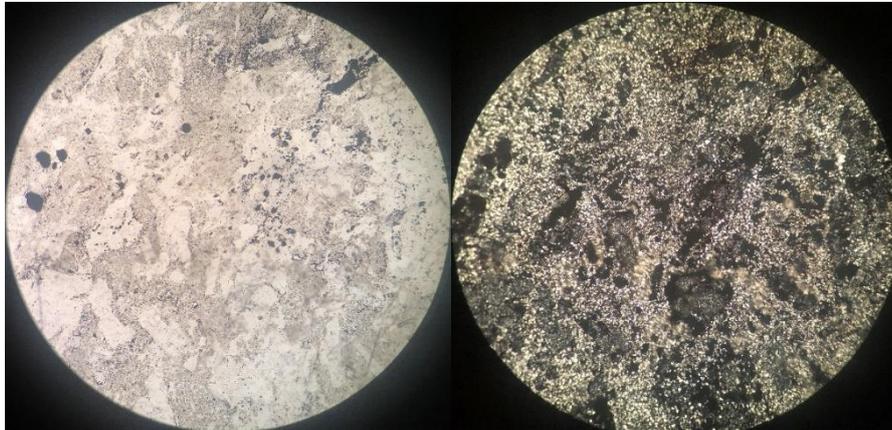


Fig. 41: LÁMINA No. RX4-T12-KV004

Se observan las plagioclasas y cuarzo con colores de primer orden, en la parte central se observan ferromagnesianos cloritizados, las manchas que observan de color negro, son minerales opacos (metálicos).

Elaboración de mapas temáticos según los criterios evaluados

Precipitación:

Para la elaboración de las isoyetas de la microcuenca, se revisaron los valores medidos de la estación pluviométrica Zaruma, la cual se encuentra más cercana a la zona de estudio. Los datos proporcionados por el INAHMI, corresponden desde el año 2005-2010, con precipitaciones que van desde 1100 mm hasta los 1700 mm, clasificados en 6 rangos: 1100-1200, 1200-1300, 1300-1400, 1400-1500, 1500-1600, 1600-1700 (Fig. 42).

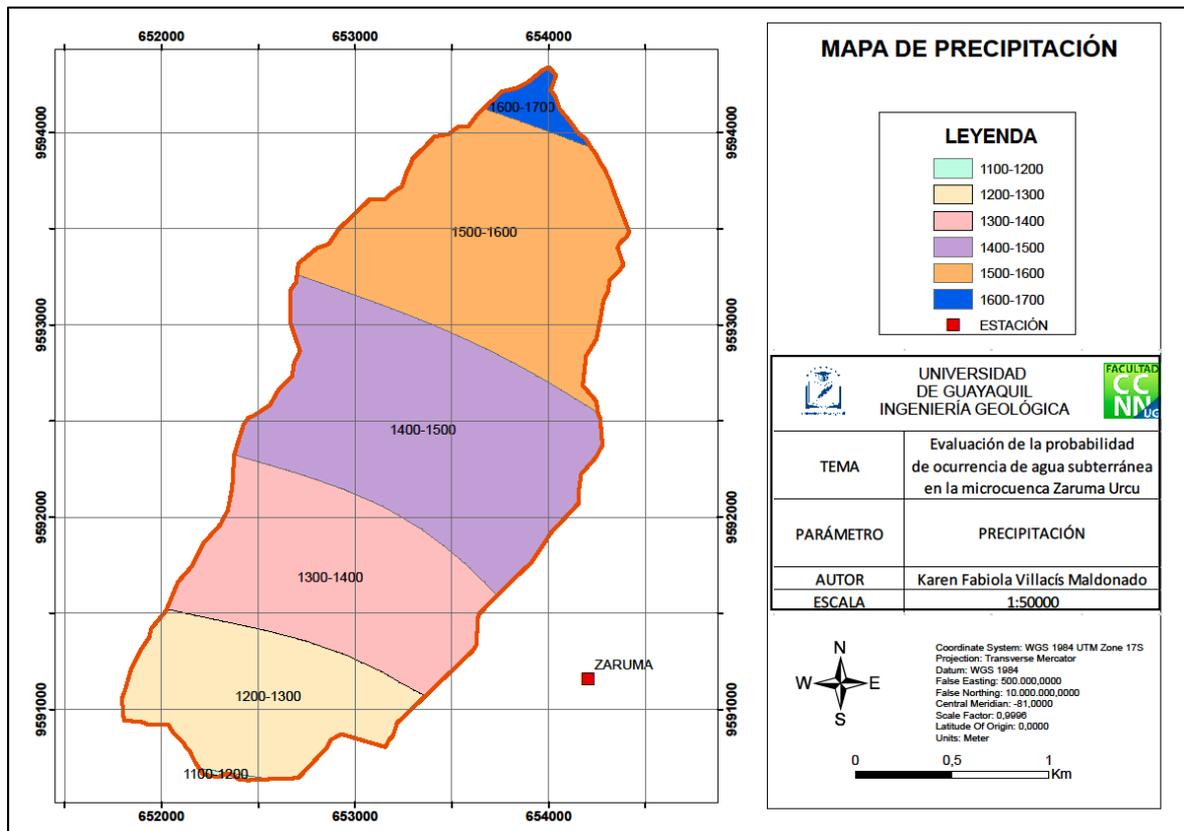


Fig. 42: Mapa de Precipitaciones (Villacís, K., 2020)

Litología:

La microcuenca Zaruma Urcu presenta litologías que van desde cuarcitas, piroclastos andesíticos y andesitas basálticas cloritizadas (lavas andesíticas), riolitas. Ver Fig. 43.

La Unidad Volcánicos Saraguro cuya edad es del Eoceno – Oligoceno, tiene como unidad que abarca dentro de la microcuenca a la Unidad Portovelo, de la cual, la Serie Portovelo abarca la zona de estudio, cuya composición litológica corresponde a lavas basálticas, con un ligero magnetismo; este tipo de roca forma parte del basamento de la microcuenca, al igual que las andesitas, encontradas en la Quebrada Zaruma Urcu.

La mayor parte de la cuenca, presenta un grado de meteorización de medio a moderado, aproximadamente el 70% está constituido de suelos residuales.

En la parte del Cerro Zaruma Urcu se encontró la toba riolítica que presentaba un bajo grado de meteorización.

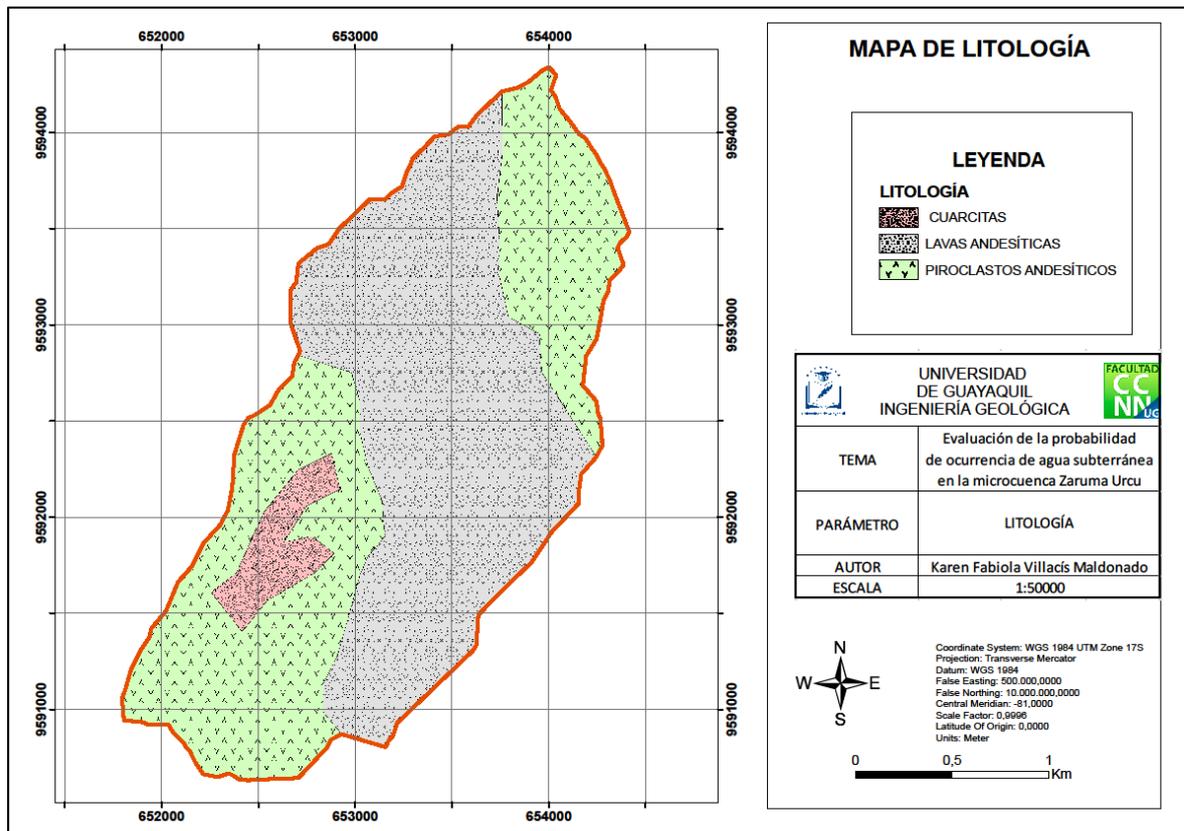


Fig. 43: Mapa de Litología, (Villacís, K., 2020)

Densidad de drenaje

Este parámetro juega también un papel importante en la ocurrencia de probabilidad de agua subterránea, tiene una relación inversa con respecto a la permeabilidad y cumple un rol primordial en la infiltración de agua en el suelo.

El mapa de densidad de drenaje se realizó a nivel regional, ya que este factor depende de la longitud de todos los ríos y para un mejor análisis con adecuado margen de error se usó toda la red de drenaje del Cantón Zaruma.

A nivel del Cantón se clasificaron 5 rangos que van desde: Muy Bajo (0-1,270 km/km²), Bajo (1,270-2,530 km/km²), Medio (2,530-3,800 km/km²), Alto (3,800-5,060 km/km²), Muy Alto (5,060-6,330 km/km²). A la Microcuenca Zaruma Urcu, le corresponden 3 rangos: Muy Bajo (0-1,270 km/km²), Bajo (1,270-2,530 km/km²), Medio (2,530-3,800 km/km²) (Fig. 44).

Aproximadamente el 80% de la microcuenca tiene una densidad de drenaje Baja.

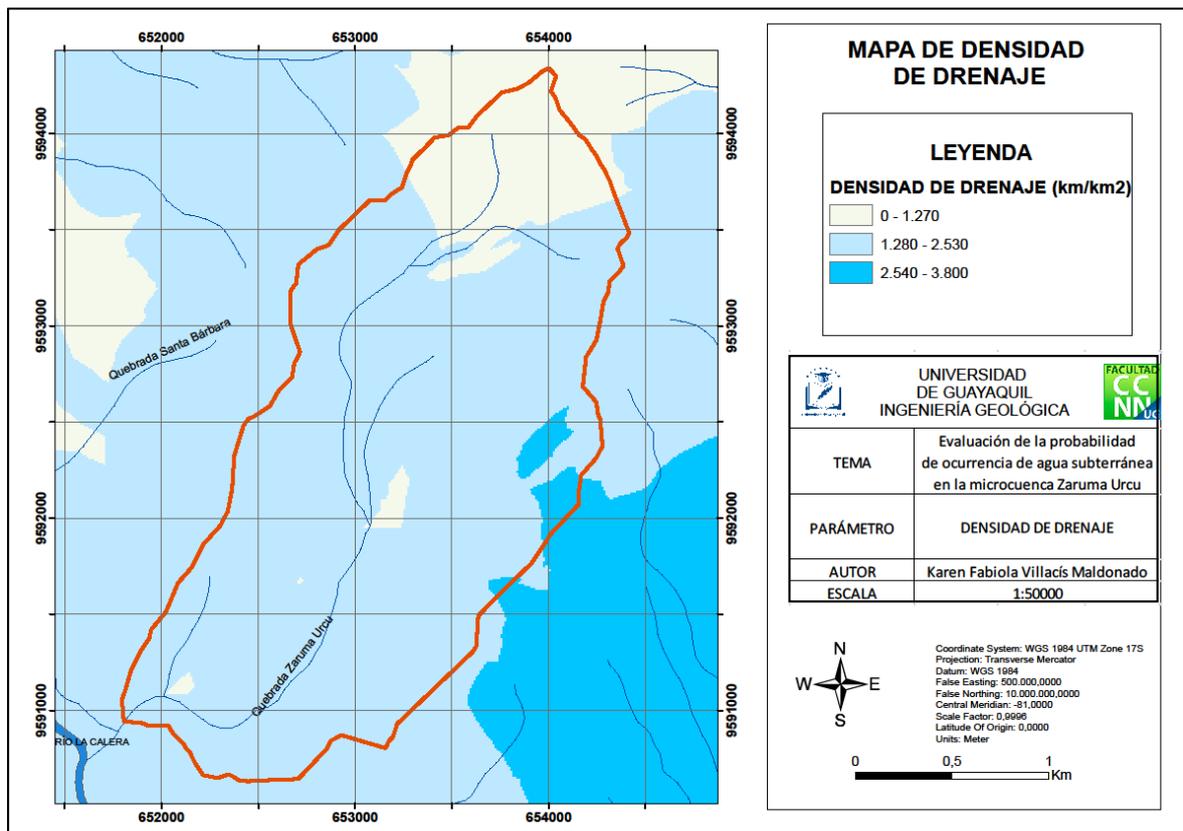


Fig. 44: Mapa de Densidad de Drenaje, (Villacís, K., 2020)

Pendiente

El área de estudio presenta una geomorfología diversa, con valles, colinas, cerros y montañas, las zonas con mayor acumulación y probabilidad de ocurrencia de agua subterránea son aquellas que no tienen pendientes pronunciadas, por lo tanto este parámetro no debe ser excluido al momento de realizar el estudio.

El área de estudio se clasificó en 5 rangos de pendiente, Suave (0° - 12°), Accidentado (12° - 25°), Fuerte (25° - 50°), Muy Fuerte (50° - 75°), Escarpado o Montañoso ($>75^{\circ}$). Las pendientes Fuertes abarcan el 53,64% dentro de la microcuenca Zaruma Urcu, seguido con un 20,61% de terrenos accidentados, 12,27% pertenecen a zonas con pendiente suave, los terrenos que presentan pendientes Muy Fuertes ocupan el 10,58%, y las pendientes Escarpadas o Montañosas engloban un 2,90% dentro de la microcuenca.

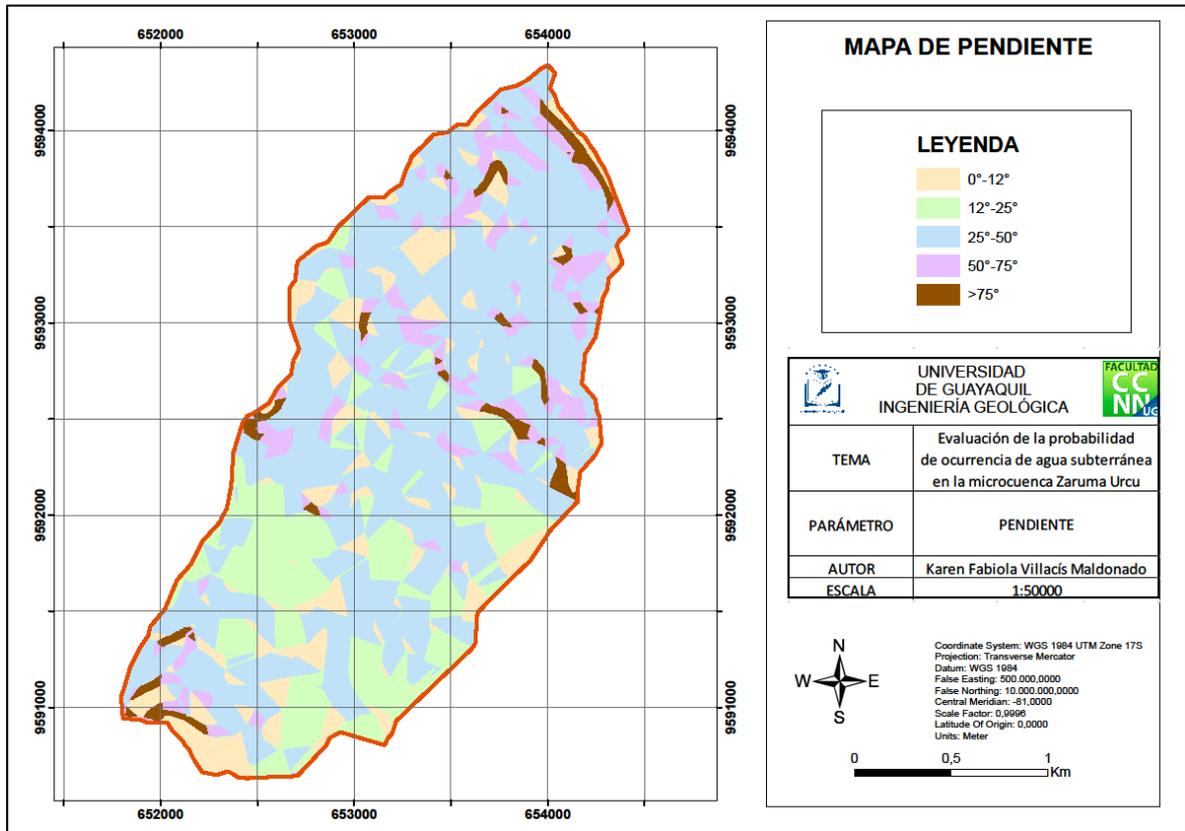


Fig. 45: Mapa de Pendiente, (Villacís, K., 2020)

Permeabilidad e Infiltración de agua en el suelo

El mapa de velocidad de infiltración se elaboró a partir de la herramienta Krigging en el programa Arcgis 10.3, cuyos rangos se dividieron en 4 desde 150-480 mm/h, luego se hizo la reclasificación según la tabla establecida anteriormente.

La velocidad de infiltración de agua en la microcuenca Zaruma Urcu, depende de la textura de suelo presente en la zona de estudio, se dividió a este parámetro en 4 rangos, Muy Rápido (>60 mm/h), Rápido (20-60 mm/h), Medio Lento (5-10 mm/h), Lento (<5 mm/h).

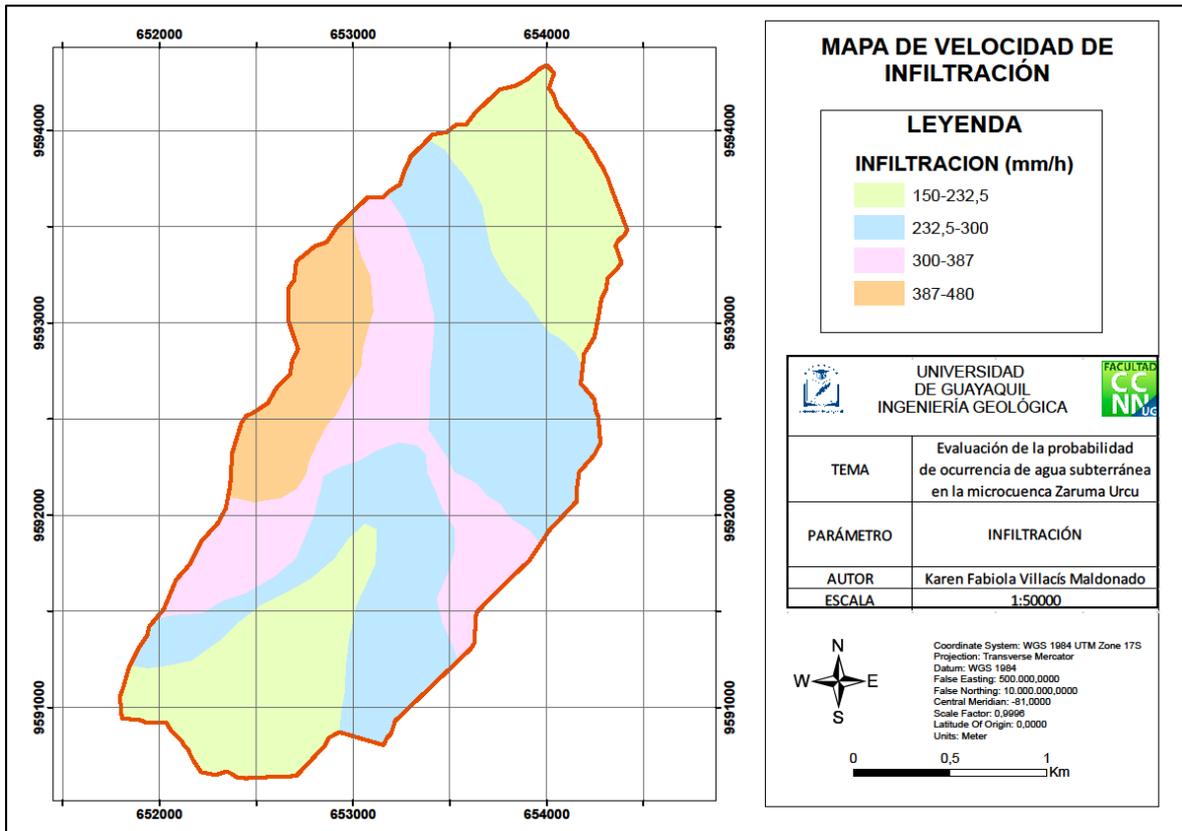


Fig.46: Mapa de Infiltración, (Villacís, K., 2020)

Textura de Suelo

Las texturas que se determinaron mediante ensayos de laboratorio son Franca Arcillo-Arenosa, Arcillosa, Franco-Arcillosa, Franca, Franco-Arenosa, los suelos más favorables para la acumulación de agua subterránea son los suelos francos y franco arenosos, a pesar de que son texturas medias, que poseen propiedades que permiten la libre circulación de agua subterránea.

Los suelos que predominan en la microcuenca son los suelos franco arcilloso-arenoso con un 45,60%, los suelos Arcillosos le siguen con un 22,45%, las texturas franco arcillosas tienen un 21,34%, la textura Franca y Franco Arenosa aparece en un 10,61% y 3,96% respectivamente. Ver Fig. 47.

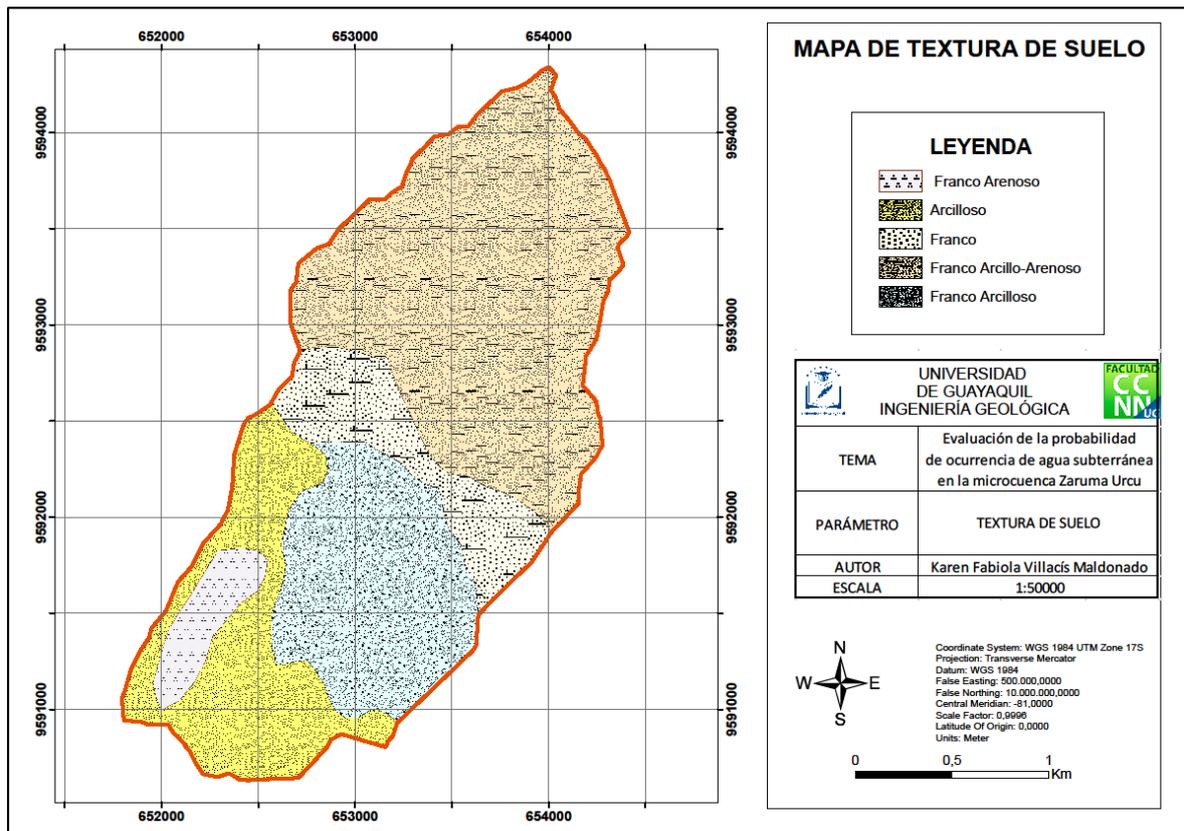


Fig. 47: Mapa de Textura de Suelo, (Villacís, K., 2020)

Uso de Suelo

El cantón Zaruma se caracteriza por la minería y su actividad agropecuaria. Gran parte del cantón se encuentra regida por la minería, aunque en los últimos años, han creado una zona de exclusión debido a hundimientos de tierra en el centro del cantón. En la parte Norte del cantón predomina la arboricultura tropical con un 32,06%, seguido de la actividad agrícola con un 22,61%, la actividad minera ocupa un 22,44% de toda la microcuenca Zaruma Urcu, los asentamientos humanos, que incluyen edificios, haciendas, etc, abarca dentro de la zona de estudio un 18,76%, la vegetación arbustiva se encuentra presente en un menor porcentaje con respecto al resto con un 4,15%.

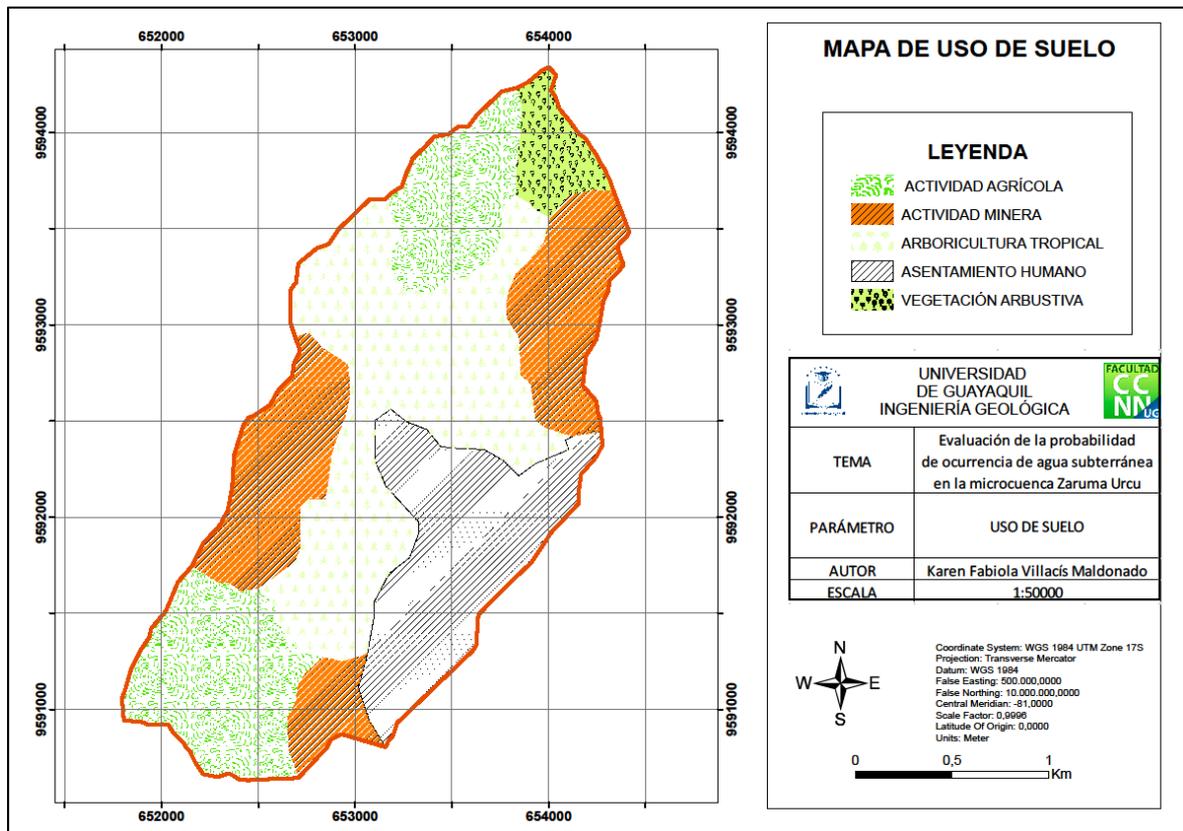


Fig. 48: Mapa de Uso de Suelo, (Villacís, K., 2020)

Ponderación de capas temáticas

Una de las condiciones para el análisis multicriterio es darle un valor a cada uno de los parámetros que se seleccionaron para el potencial de ocurrencia de agua subterránea. Este valor oscila, según la metodología de Saaty del 1-9, donde 1 representa los factores con menos importancia en relación a aquel que se le asigne un valor de 9. Por tanto se realizó una matriz comparativa en el cual los expertos, según su criterio, les asignaron valores a estas capas.

La encuesta se realizó a 6 Ingenieros Geólogos con experticia en el tema y se utilizaron además los resultados de dos autores (Kumar, T., et al, 2013 & Murthy, K.S.R, et al, 2009), con trabajos similares para búsquedas de zonas con potencial de ocurrencia de subterránea.

La Tabla 20 muestra la matriz comparativa, la cual está matemáticamente verificada y sin margen de error (Tabla 21). Estas tablas se encuentran en los Anexo 8-17 donde se detallan todas las encuestas realizadas.

A: Pendiente, B: Precipitación, C: Densidad de Drenaje, D: Infiltración, E: Textura,
F: Litología, G: Uso de Suelo.

Tabla 21: Encuesta tipo realizada a expertos, (Villacís, K., 2020).

	A	B	C	D	E	F	G	PESO	PESO (*100)
A	1,00	1,00	3,00	1,00	0,13	1,00	0,25	0,06916122	6,91
B	1,00	1,00	1,00	1,00	0,11	0,17	0,33	0,04810303	4,81
C	0,33	1,00	1,00	0,14	0,13	0,11	0,14	0,02867733	2,87
D	1,00	1,00	7,00	1,00	0,17	1,00	1,00	0,10012588	10,01
E	8,00	9,00	8,00	6,00	1,00	5,00	6,00	0,47947356	47,95
F	1,00	6,00	7,00	1,00	0,20	1,00	1,00	0,13510702	13,51
G	4,00	3,00	7,00	1,00	0,17	1,00	1,00	0,13935196	13,94

Tabla 22: Radio de consistencia según Saaty de la encuesta N°1

N° ELEMENTOS	7
INDICE RADIO DE SAATY	1,320
CI	0,13263503
RADIO DE CONSISTENCIA (CR)	0,100
Ymax	7,79581018

Cada una de las encuestas realizadas, al final fueron promediadas para obtener el Peso Normalizado de cada capa temática (Tabla N° 22).

Tabla 23: Análisis Jerárquico de la microcuenca Zaruma Urcu.

PARÁMETROS	PORCENTAJE (%)
TEXTURA DE SUELO	26,34
LITOLOGIA	17,40
USO DE SUELO	13,23
PRECIPITACIÓN	12,80
PENDIENTE	11,99
INFILTRACIÓN	10,90
DENSIDAD DE DRENAJE	7,34

Ponderación de las subclases.

Los valores asignados a cada una de las subclases de cada capa temática fueron obtenidos de artículos científicos y del Ing. Borja,C., quien tiene experiencia en el área de Hidrogeología.

La escala de valor establecida fue del 1-9 según Saaty.

La matriz comparativa fue realizada a cada parámetro para luego proceder a jerarquizar las subclases.

Textura de Suelo

Los suelos franco arenosos son los que más favorecen la acumulación de agua subterránea dada sus propiedades físicas, junto a los suelos francos. Aquellos suelos que tienen textura arcillosa, son las menos idóneas para albergar o permitir la acumulación y circulación de este recurso. En la Tabla 23 se muestra la matriz para jerarquizar cada textura del suelo.

Tabla 24: Matriz Comparativa de Textura de Suelo. CR= 0,0834

	Franco Arenoso	Franco	Franco Arcillo-Arenoso	Franco Arcilloso	Arcilloso	PESO
Franco Arenoso	1,000	3,000	5,000	7,000	9,000	0,5028195
Franco	0,333	1,000	3,000	5,000	7,000	0,2602315
Franco Arcillo-Arenoso	0,200	0,333	1,000	3,000	5,000	0,1343504
Franco Arcilloso	0,143	0,200	0,333	1,000	3,000	0,0677776
Arcilloso	0,111	0,143	0,200	0,333	1,000	0,0348208
SUMA	1,787	4,676	9,533	16,333	25,000	

(Villacís, K., 2020)

Litología

En cuanto a las rocas presentes en la microcuenca, las tobas andesíticas son aquellas que permiten una mejor acumulación, a diferencia de las andesitas basálticas. Esto se debe a que las mismas presentan un nivel moderado de fracturamiento (Tabla 24).

Tabla 25: Matriz Comparativa de Litología. CR= 0,0478

	Toba Andesítica	Cuarcita	Andesita Basáltica	Peso
Toba Andesítica	1,000	3,000	5,000	0,63334572
Cuarcita	0,333	1,000	3,000	0,26049796
Andesita Basáltica	0,200	0,333	1,000	0,10615632
SUMA	1,533	4,333	9,000	

(Villacís, K., 2020)

Uso de Suelo.

Para este parámetro la vegetación arbustiva es aquel que debido sus propiedades físicas, permite la ocurrencia de agua subterránea sin impedir su acumulación, a diferencia de la actividad agrícola que capta este recurso para el riego, de igual forma ocurre con la actividad minera y el asentamiento urbano. Ver Tabla 25.

Tabla 26: Matriz comparativa de Uso de suelo. CR= 0,0833

	Actividad agrícola	Arboricultura	Asentamientos urbanos	Vegetación arbustiva	Minería	Peso
Actividad agrícola	1,000	0,500	2,000	0,333	3,000	0,1676
Arboricultura	2,000	1,000	3,000	0,500	3,000	0,254
Asentamientos urbanos	0,500	0,333	1,000	0,500	0,500	0,0981
Vegetación arbustiva	3,000	2,000	2,000	1,000	5,000	0,3828
Minería	0,333	0,333	2,000	0,200	1,000	0,0975
SUMA	6,833	4,167	10,000	2,533	12,500	

(Villacís, K., 2020)

Precipitación

La escala de valores para esta subclase, va a depender de la cantidad de lluvia, es decir que mientras más mm de lluvia caiga en el sector, mejor y mayor será el aporte para la ocurrencia del agua subterránea. Ver Tabla 26.

Tabla 27: Matriz Comparativa de Precipitación. CR= 0,0138

	1100-1200	1200-1300	1300-1400	1400-1500	1500-1600	1600-1700	Peso
1100-1200	1,000	0,500	0,333	0,200	0,143	0,111	0,033909
1200-1300	2,000	1,000	0,500	0,333	0,200	0,143	0,05468703
1300-1400	3,000	2,000	1,000	0,500	0,333	0,200	0,09034552
1400-1500	5,000	3,000	2,000	1,000	0,500	0,333	0,154
1500-1600	7,000	5,000	3,000	2,000	1,000	0,500	0,25424362
1600-1700	9,000	7,000	5,000	3,000	2,000	1,000	0,41281483
SUMA	27,000	18,500	11,833	7,033	4,176	2,287	

(Villacís, K., 2020)

Pendiente

El papel de la pendiente en la ocurrencia de agua subterránea es también un parámetro importante, las zonas con bajos grados de pendiente, favorecen a la acumulación de este recurso a diferencia de aquellos lugares que presentan pendientes $>35^\circ$ cuyas condiciones geomorfológicas no permiten su almacenamiento. Ver Tabla 27.

Tabla 28: Matriz Comparativa de Pendiente. CR= 0,0928

Grados (°)	0-7,47	7,48-17,9	18-26	26,1-36,4	36,5-76,2	Peso
0-7,47	1,000	3,000	5,000	7,000	8,000	0,4966233
7,48-17,9	0,333	1,000	3,000	5,000	7,000	0,2622773
18-26	0,200	0,333	1,000	3,000	5,000	0,13584454
26,1-36,4	0,143	0,200	0,333	1,000	3,000	0,0686544
36,5-76,2	0,125	0,143	0,200	0,333	1,000	0,03660046
SUMA	1,801	4,676	9,533	16,333	24,000	

(Villacís, K., 2020)

Infiltración

A mayor velocidad de infiltración, mayor es la capacidad que tiene un suelo para absorber, acumular y formar agua subterránea.

Tal como indicaron los resultados de campo, la velocidad de infiltración más alta es de 248,80 mm/h, siendo esta velocidad la más propicia, por lo cual tiene un mayor peso en la matriz comparativa. Ver Tabla 28

Tabla 29: Matriz Comparativa de Infiltración. CR= 0,03

	150-232,5	232,5-300	300-387,5	387,5-480	PESO
150-232,5	1,000	0,500	0,333	0,200	0,08828734
232,5-300	2,000	1,000	0,500	0,333	0,15750839
300-387,5	3,000	2,000	1,000	0,500	0,2717977
387,5-480	5,000	3,000	2,000	1,000	0,48240658
SUMA	11,000	6,500	3,833	2,033	

(Villacís, K., 2020)

Densidad de Drenaje

Mientras menor densidad de drenaje se obtenga, mejores serán las condiciones de albergar agua subterránea de la microcuenca Zaruma Urcu, por eso en el área de estudio, el mayor peso pertenece a la densidad de drenaje que oscila entre 0-0,9 km/km² (Murthy K.S.R et al, 2009). La Tabla 29 muestra como los rangos de valores demuestran una disminución de potencial subterráneo.

Tabla 30: Matriz Comparativa de la Densidad de Drenaje. CR= 0,083

km/km ²	0-1,270	1,270-2,530	2,530-3,800	3,800-5,060	5,060-6,330	Peso
0-1,270	1,000	3,000	5,000	7,000	9,000	0,5028195
1,270-2,530	0,333	1,000	3,000	5,000	7,000	0,26023159
2,530-3,800	0,200	0,333	1,000	3,000	5,000	0,13435044
3,800-5,060	0,143	0,200	0,333	1,000	3,000	0,06777767
5,060-6,330	0,111	0,143	0,200	0,333	1,000	0,03482081
SUMA	1,787	4,676	9,533	16,333	25,000	

(Villacís, K., 2020)

Mapa de Potencial de ocurrencia de agua subterránea y validación.

Una vez realizadas todas las ponderaciones y análisis de cada una de las capas, se procede a hacer un Análisis Espacial con la herramienta Calculadora Ráster, usando el programa Arcgis 10.3, dicha herramienta permite realizar una combinación lineal ponderada, usando todas las variables con sus respectivas subclases (Tablas 23-29), cada una con sus pesos asignados.

El cálculo del potencial de ocurrencia, por sus siglas GWPI fue tomado de GroundWater Potencial Index, para definir los potenciales hídricos de la subcuenca (Murthy, K. S. R., et al, 2009, Ayele, A. F., et al, 2014, Kumar, T., et al, 2013, Singh, V.O., et al, 2016, Macas-Espinoza, et al., 2017).

La fórmula GWPI, será la suma de cada uno de los parámetros analizados.

$$\text{GWPI} = (0,2635) * (\text{Textura de Suelo}) + (0,1740) * (\text{Geología}) + (0,1323) * (\text{Uso de Suelo}) + (0,1280) * (\text{Precipitación}) + (0,1199) * (\text{Pendiente}) + (0,1090) * (\text{Infiltración}) + (0,0734) * (\text{Densidad de Drenaje})$$

El resultado se muestra en la Figura 48, donde se muestran las zonas con un potencial Excelente, Bueno, Regular o Malo dentro de la microcuenca Zaruma Urcu. Como resultado el 44,56% del área de estudio tiene un buen potencial para ocurrencia de agua subterránea y el 22,37% no presenta buenas condiciones para encontrar este recurso.

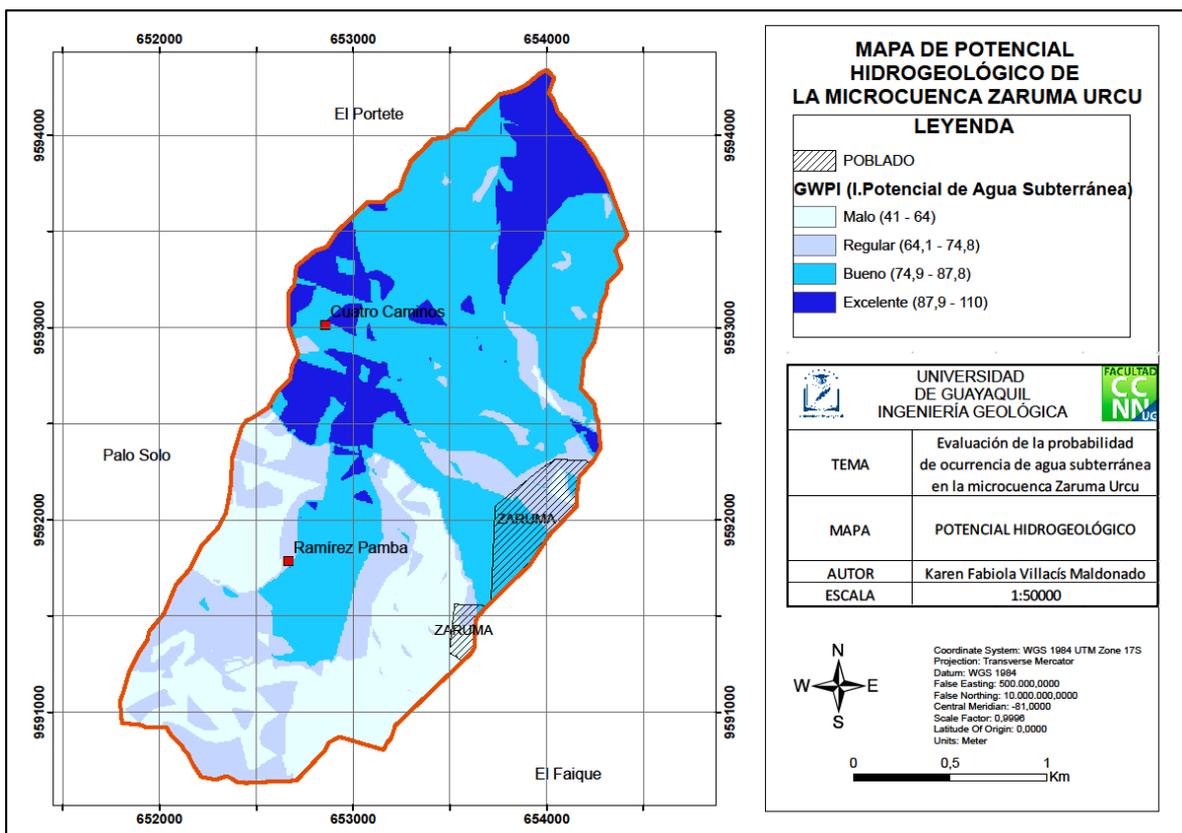


Fig.49: Mapa de Potencial Hidrogeológico, (Villacís, K., 2020).

Las mejores áreas prospectivas para la búsqueda de subterránea se encuentran en las zonas de Ramírez Pamba, dado que la velocidad de infiltración y la textura del suelo favorecen la acumulación de este recurso, a diferencia de sectores como Vizcaya y Cerro El Calvario que debido a la actividad minera, asentamientos humanos y densidad de drenaje media no influyen favorablemente a su reserva, a pesar de tener zonas con pendientes bajas y de tener lluvias fuertes.

Al Norte de la microcuenca a pesar de tener excelentes condiciones de ocurrencia de agua subterránea, en esta zona las pendientes son $>75^\circ$ lo cual no permite que el agua se infiltre en el suelo, esto se puede corroborar con la velocidad de infiltración determinada como lenta.

El sector de Cuatro Caminos, por el índice de potencial de agua subterránea indicó ser una zona excelente, no se puede prospectar este recurso debido a las pendientes fuertes y elevados niveles de precipitaciones, donde toda el agua caída buscará zonas más bajas para acumularse.

Para validar el mapa final de potencial hidrogeológico para la ocurrencia de agua subterránea, se puede realizar un análisis de imágenes satelitales, combinando las bandas N° 5, 6, 2, cuyo resultado muestra una gama de colores que indica características físicas de la zona de estudio, el color azul muestra zonas con presencia de agua, la tierra se representa de color naranja y verde.

Esta validación mediante imágenes satelitales, junto a las salidas de campo realizadas, permitieron corroborar evidencias de puntos de agua dentro de la microcuenca, facilitando así la búsqueda de los probables puntos de agua subterránea.

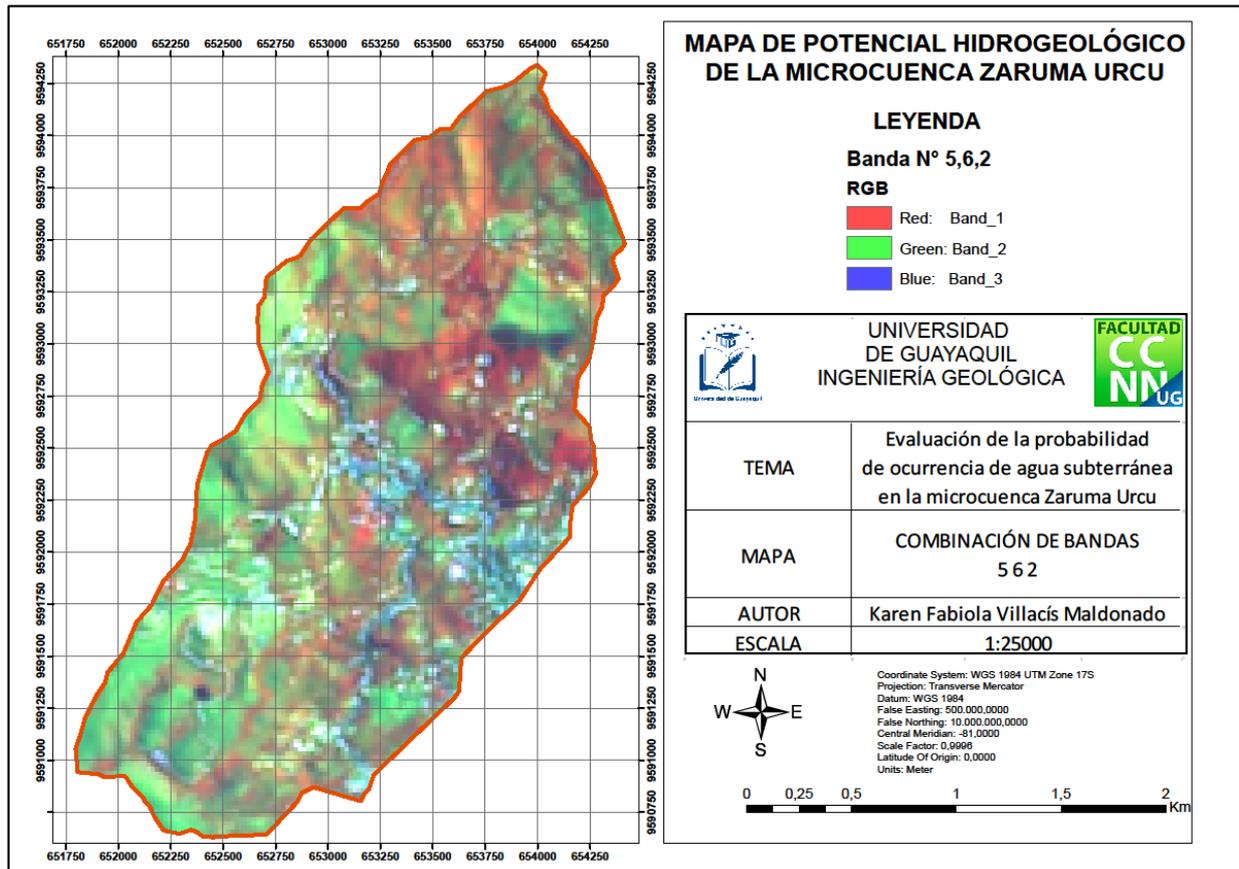


Fig.50: Imagen Satelital Tierra/Agua de la microcuenca Zaruma Urcu

CAPÍTULO V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Las rocas ígneas que afloran, determinadas a través de análisis petrográfico, corresponden a andesitas que conforman gran parte de la zona de estudio; pertenecen a la Serie Portovelo de la Unidad Saraguro.
- La zona presenta suelos residuales, de finos a medios, cuya textura predominante es arcillosa y franco arcillo-arenosa.
- Los suelos no se encuentran en total saturación, por el contrario la cantidad de agua disponible en el suelo la aprovechan las plantas, pero a medida que se profundiza esa agua es retenida en el suelo, empezando a saturarse y drenar libremente por efecto de la gravedad (Capacidad de campo).
- La velocidad de infiltración mediante ensayos de campo y posterior cálculo, dio como resultado que la microcuenca tiene una rápida velocidad para infiltrar el agua esto también se encuentra relacionado a la textura de suelo presente en el área de estudio.
- De acuerdo al análisis Jerárquico de Saaty, dentro de la microcuenca Zaruma Urcu, la textura de suelo es el parámetro que más influye en la ocurrencia de agua subterránea con un 26,34%, la litología actúa en un 17,40%, el uso de suelo representa un 13,23% en la probabilidad de ocurrencia, la precipitación dentro del área de estudio interviene en un 12,80%, el parámetro de la pendiente, infiltración y densidad de drenaje tienen un porcentaje de influencia de 11,99%, 10,90% y 7,34% respectivamente.
- Se clasificaron 4 rangos de Potencial de Agua Subterránea: Malo, Regular, Bueno y Excelente.
- De acuerdo con los rangos establecidos, dentro de la microcuenca Zaruma Urcu, la categoría Excelente representa un 14,05% con una extensión de 0,73 km²; en esta zona se encuentran el Cerro Calvario y Vizcaya; con un área de 2,31 km², se presenta con categoría de Buena, con un 44,56%, una de las mejores áreas prospectivas dentro de esta categoría se encuentra el Barrio Ramírez Pamba, la categoría Regular constituye un

19% de acuerdo a la probabilidad de encontrar agua subterránea, tiene un área correspondiente a 0,98 km² y el 22,37% de la microcuenca pertenece al rango más bajo de la probabilidad de ocurrencia de agua subterránea, categoría Malo, con una extensión de 1,15 km².

Recomendaciones

- Aplicar herramientas geofísicas y complementar el análisis de velocidad de infiltración, de esa forma se podría conocer la Saturación eléctrica, su resistividad y otras condiciones con respecto al movimiento del agua.
- Estudiar las cuencas aledañas a la Microcuenca Zaruma Urcu y realizar el mismo estudio, para en un futuro realizar compilaciones de mapas con potencial hidrogeológico para búsqueda de ocurrencia de agua subterránea y obtener como producto final, un mapa regional de todo el Cantón Zaruma.

Referencias

- Agumase, T. K., Enku, T., Mamaru, A. M., S., G. B., & Haimanot, B. A. (2019). Spatial Analysis of Groundwater Potential Using GIS Based Multi Criteria Decision Analysis Method in Lake Tana Basin, Ethiopia. Springer Nature Switzerland.
- Almaw, F. A., Addis, K., Gebreyohannes Tesfamichael, & Gebrerufael, H., 2014, Spatial analysis of groundwater potential using remote sensing and GIS-based multi-criteria evaluation in Raya Valley, northern Ethiopia, Hydrogeology Journal, 195-206.
- Alvarado, C., Barahona-Palomo, M., 2016, Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del Río Suqulapa, El Salvador, 1-12pp.
- Andualem, T.G., Demeke, G. G., 2019, Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia, Journal of Hydrology: Regional Studies.
- Argaz, A., Ouahman, B., Darkaoui, A., Bikhtar, H., Yabsa, K., Laghzal, A., 2019, Application of Remote Sensing Techniques and GIS-Multicriteria decision Analysis for Groundwater Potential Mapping in Souss Watershed, Morocco, Journal of Materials and Environmental Sciences.
- ASTM D-2216, J. E. Bowles (Experimento N° 1), MTC E 108, 2000, Método de ensayo para determinar el contenido de humedad natural del suelo.
- Ayala, O., Duque, J., González, S., Herrera, M., Sánchez, D., 2015, Levantamiento de cartografía temática escala 1:25.000, Lote 2: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, Memoria Técnica, 631 pp.
- Ayele A, F., Tesfamichael, G., Gebrerufaet, H., 2014, Spatial analysis of groundwater potential using remote sensing and GIS-based multi-criteria evaluation in Raya Valley, northern Ethiopia, Hydrogeology Journal
- Blanquer, J., Ibáñez, S., Moreno-Ramón, H., 2010, La textura de un suelo, España, ResearchGate.

Buckalew, James O., Scott, L., Maurice James, P.E., Redd, P., 1998, Water Resources Assessment of Ecuador, 13-17 pp.

CEPAL. (s.f.). Diagnóstico de la Estadística del Agua en Ecuador.

Ciancaglini- Prosap, N., Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico, 10pp.

Collazo, M., Montaña, J., 2012, Manual de Agua Subterránea, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Uruguay., 16-18 pp.

Food and Agricultural Organization (FAO), Ground water occurrence, accedido [<http://www.fao.org/3/x5567e/x5567e03.htm>]

Food and Agricultural Organization (FAO), 2009, Guía para la descripción de suelos, Cuarta edición: <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf> (accedido diciembre, 2019).

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Zaruma (GAD), 2018, Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, Zaruma, 208 pp.

Ibáñez Juan J., 2006, El Agua en el Suelo 4: Textura del Suelo y Propiedades Hídricas (blog), Madrid, <<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/07/05/33887/comment-page-1>>, consulta: 20 de diciembre de 2019.

Kalkish, Kamal. & Abia, 2017, Evaluation of Groundwater Recharge Potential Using GIS – Case study at the Salmon River Watershed.

Kovalevsky, V.S., Kruseman, G.P., Rushton, K.R., 2004, Groundwater studies: An International guide for hydrogeological investigations, in Rebouças, A.C., Well drilling and design methods: Paris, UNESCO, 185-215.

Leduc C, Favreau G, Schroeter P. Long-term rise in a Sahelian water - table: the Continental Terminal in south-west Niger. J Hydrol 2001; 243:43e54.

Macas-Espinoza, V. X., & López-Escobar, K. (2018). Potencial para la exploración de aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo, Ecuador, utilizando un proceso de análisis jerárquico basado en SIG y teledetección. Asociación Española de Teledetección, 11.

Madrucci V, Taioli F, Cesar de Araujo C (2008) Groundwater favorability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, Sao Paulo State, Brazil. *J Hydrol* 357:153–173

Manap, M.A., Nampak. H., Pradhan, B., Lee, S., Sulaiman, W.N.A., Ramli, M.F., 2012, Application of probabilistic-based frequency ratio model in groundwater potential mapping using remote sensing data and GIS., *Arabian Journal of Geosciences.*, Springer, 1-14.

Manap, M.A., Sulaiman, W.N.A., Ramli, M.F., Pradhan, B., Surip, N., 2011, A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia, *Arabian Journal of Geosciences.*, Springer, 6, 1621-1637.

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, República Oriental de Uruguay, Dirección General de Recursos Naturales Renovables (MGAP-RENARE), 2014, Manual de descripción, muestreo de suelo y análisis de laboratorio, 29p.

Murthy, K.S.R. & Mamo, A.G., 2009, Multi-criteria decision evaluation in groundwater zones identification in Moyale-Teltele subbasin, South Ethiopia, *International Journal of Remote Sensing*, 30 (11)., 2729-2740. DOI: 10.1080/01431160802468255.

Oliva, A., Ruiz, A., 2015, Inestabilidad del terreno en zonas urbanas de Zaruma y Portovelo, Ecuador. Factores condicionantes y desencadenantes, ResearchGate.

Rincón Rivera, S. S., 2018, Propuesta metodológica para la prospección de acuíferos subterráneos usando métodos de análisis espacial en el departamento del Cesar, Colombia., Universidad de Salzburg, tesis de maestría, 80pp.

Secretaría del Agua; Inamhi; Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito; Espol. (2016). “Mejora del conocimiento de aguas subterráneas para contribuir a su protección, gestión integrada y gobernaza en América Latina” Capítulo Ecuador. Gestión Integrada para la protección y aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos por cuencas”, (pág. 32). Quito.

Senanayake, I.P., Dissanayake. D.M.D.O.K., Mayadunna, B.B., Weerasekera, W.L., 2016, An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques, *Geoscience Frontiers*, 7, 115-124.

Shaban A, Khawlie M, Abdallah C., 2006, Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon., *Hydrogeology Journal*, 14: 433-43.

Soil Survey Staff. 2014. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service

Terán , P. (2018). Programa de Capacitación Técnica e implementación del Proyecto de Fortalecimiento de las Escuelas del agua. Quito.

U.S Southern Command Engineer's; U.S. Army Corps of Engineers District in Mobile. & U.S Army Corps of Engineers Topographic. (1998). Water Resources Assessment of Ecuador.

Vélez, M., Vélez., J. 2002. Capítulo 8: Infiltración. Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Hidráulica. [<http://poseidon.unalmed.edu.co/materias/hidrologia.html>], consultado: febrero del 2020.

Anexos

Anexo 1: Tabla de cálculo de velocidad de infiltración

Tiempo parcial (min)	Tiempo acumulado (TA) (min)	Lámina infiltrada en el intervalo (mm)	Lámina acumulada (mm)	Velocidad de infiltración acumulada (mm/min)	Velocidad de infiltración (mm/hr)

Anexo 2: Ensayo de Infiltrómetro en la microcuenca Zaruma Urcu.



Anexo 3: Instrumentos para el análisis de textura y humedad natural.



Anexo 4: Muestras de perfiles de suelo N° 1, 2, 3, 4, 5, para determinar su textura.



Anexo 5: Muestras de perfiles de suelo N° 6, 7, 8, 9.



Anexo 6: Muestra del Perfil N° 10



Anexo 7: Ensayo de análisis de textura en el laboratorio, mediante el Método Organoléptico.



Anexo 8: Matriz Comparativa N°1 para Jerarquizar las variables a utilizar.

	A	B	C	D	E	F	G	PESO
A	1,000	0,167	0,333	0,250	0,333	0,500	0,500	0,049077567
B	6,000	1,000	3,000	1,000	2,000	0,333	1,000	0,188152393
C	3,000	0,333	1,000	0,333	0,500	0,500	1,000	0,090827865
D	4,000	1,000	3,000	1,000	1,000	3,000	1,000	0,214123573
E	3,000	0,500	2,000	1,000	1,000	0,500	0,500	0,121364188
F	2,000	3,000	2,000	0,333	2,000	1,000	1,000	0,184741646
G	2,000	1,000	1,000	1,000	2,000	1,000	1,000	0,151712768
SUMA	21,000	7,000	12,333	4,917	8,833	6,833	6,000	

Anexo 9: Índice de Consistencia de la matriz N° 1

N° ELEMENTOS	7
INDICE RADIO DE SAATY	1,320
CI	0,127568069
RADIO DE CONSISTENCIA (CR)	0,096642476
y _{max}	7,765408412

Anexo 10: Matriz Comparativa N°2 para Jerarquizar las variables a utilizar.

	A	B	C	D	E	F	G	PESO
A	1,000	3,000	3,000	0,500	2,000	0,500	3,500	0,17937888
B	0,333	1,000	0,500	2,000	2,000	0,333	1,000	0,1022722
C	0,333	2,000	1,000	0,500	0,833	0,200	0,429	0,07383389
D	2,000	0,500	2,000	1,000	1,000	0,333	0,333	0,11507582
E	0,500	0,500	1,200	1,000	1,000	0,250	1,750	0,08359188
F	2,000	3,000	5,000	3,000	4,000	1,000	7,000	0,33626805
G	0,286	1,000	2,333	3,000	0,571	0,250	1,000	0,10957928
SUMA	6,452	11,000	15,033	11,000	11,405	2,867	15,012	

Anexo 11: Índice de Consistencia de la matriz N°2

N°ELEMENTOS	7
INDICE RADIO DE SAATY	1,320
CI	0,203421022
RADIO DE CONSISTENCIA (CR)	0,154106835
y _{max}	8,220526131

Anexo 12: Matriz Comparativa N° 3 para Jerarquizar las variables a utilizar.

	A	B	C	D	E	F	G	PESO
A	1,000	0,111	8,000	8,000	0,125	1,000	0,125	0,075802986
B	9,000	1,000	8,000	8,000	9,000	9,000	1,000	0,325304951
C	0,125	0,125	1,000	0,125	0,125	0,125	0,111	0,01862679
D	0,143	0,125	8,000	1,000	0,143	0,125	0,111	0,041865841
E	8,000	0,111	8,000	7,000	1,000	1,000	0,111	0,10687267
F	7,000	0,111	8,000	8,000	1,000	1,000	0,125	0,106945611
G	9,000	1,000	9,000	9,000	9,000	8,000	1,000	0,32458115
SUMA	34,268	2,583	50,000	41,125	20,393	20,250	2,583	

Anexo 13: Índice de Consistencia de la matriz N° 3.

N°ELEMENTOS	7
INDICE RADIO DE SAATY	1,320
CI	0,712439716
RADIO DE CONSISTENCIA (CR)	0,539727058
y _{max}	11,2746383

Anexo 14: Matriz Comparativa N° 4 para Jerarquizar las variables a utilizar.

	A	B	C	D	E	F	G	PESO
A	1,000	0,125	0,143	0,111	0,111	0,111	0,125	0,016889477
B	8,000	1,000	7,000	0,111	0,125	0,125	0,125	0,065458219
C	7,000	0,143	1,000	0,111	0,125	0,143	0,125	0,038679802
D	9,000	9,000	9,000	1,000	0,111	0,200	0,111	0,117186792
E	9,000	8,000	8,000	9,000	1,000	0,111	1,000	0,199200067
F	9,000	8,000	7,000	5,000	9,000	1,000	1,000	0,318982094
G	8,000	8,000	8,000	9,000	1,000	1,000	1,000	0,243603549
SUMA	51,000	34,268	40,143	24,333	11,472	2,690	3,486	

Anexo 15: Índice de Consistencia de la matriz N°4

N°ELEMENTOS	7
INDICE RADIO DE SAATY	1,320
CI	0,750220481
RADIO DE CONSISTENCIA (CR)	0,56834885
y _{max}	11,50132289

Anexo 16: Matriz Comparativa N° 5 para Jerarquizar las variables a utilizar.

	A	B	C	D	E	F	G	PESO
A	1,000	0,200	3,000	0,333	0,200	0,200	0,500	0,054808917
B	5,000	1,000	5,000	3,000	3,000	3,000	5,000	0,336050398
C	0,333	0,200	1,000	0,200	0,333	0,200	0,500	0,036824552
D	3,000	0,333	5,000	1,000	3,000	2,000	3,000	0,198491073
E	5,000	0,333	3,000	0,333	1,000	0,333	2,000	0,114631155
F	5,000	0,333	5,000	0,500	3,000	1,000	5,000	0,195554928
G	2,000	0,200	2,000	0,333	0,500	0,200	1,000	0,063638978
SUMA	21,333	2,600	24,000	5,700	11,033	6,933	17,000	

Anexo 17: Índice de Consistencia de la Matriz N°5

N°ELEMENTOS	7
INDICE RADIO DE SAATY	1,320
CI	0,126775024
RADIO DE CONSISTENCIA (CR)	0,096041685
y _{max}	7,760650147