

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**IMPACTO DE LA CALIDAD DEL AGUA UTILIZADA EN EL
PROCESO DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE
INFILTRACIÓN**

POR:

ING. ANA LUISA ARMENDÁRIZ HERNÁNDEZ

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

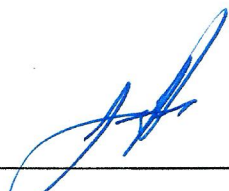
MAESTRO EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

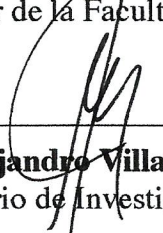
DICIEMBRE DE 2020



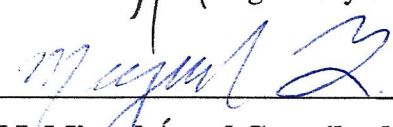
“Impacto de la calidad del agua utilizada en el proceso de recarga artificial de acuíferos mediante infiltración”. Tesis presentada por Ing. Ana Luisa Armendáriz Hernández como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:



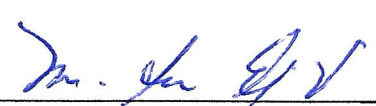
M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador Académico



Dra. María Socorro Espino Valdés
Directora de Tesis

Diciembre 2020

Fecha

Comité:

Dra. María Socorro Espino Valdés
Dr. Adán Pinales Munguía
Dr. Alejandro Villalobos Aragón
M.I. Rodrigo De La Garza Aguilar

© Derechos Reservados

Ing. Ana Luisa Armendáriz Hernández
Campus Universitario 2. Circuito
Universitario SN. CP.
Chihuahua, Chih. México

Diciembre 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

10 de diciembre de 2020

ING. ANA LUISA ARMENDÁRIZ HERNÁNDEZ
Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta dirección, propuesto y dirigido por el director la Dra. María Socorro Espino Valdés para que lo desarrolle como tesis con el título **“IMPACTO DE LA CALIDAD DEL AGUA UTILIZADA EN EL PROCESO DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE INFILTRACIÓN”**

ÍNDICE DE CONTENIDO

Dedicatoria

Agradecimientos

Resumen

Índice de Contenido

Índice de Tablas

Índice de Figuras

Capítulo 1. Generalidades

- 1.1 Introducción
- 1.2 Antecedentes
- 1.3 Justificación
- 1.4 Hipótesis
- 1.5 Objetivos



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 2. Marco teórico

- 2.1 Importancia del agua subterránea como recurso
- 2.2 Recarga de acuíferos
- 2.3 Mecanismos de infiltración
- 2.4 Naturaleza y calidad del agua
- 2.5 Propiedades de las aguas residuales
- 2.6 Importancia del proceso de destilación solar para la recarga artificial de acuíferos
- 2.7 Uso de columnas de suelo para evaluar la calidad del agua resultante en pruebas de infiltración

Capítulo 3. Descripción de la zona de estudio

- 3.1 Localización y vías de acceso
- 3.2 Situación administrativa del acuífero
- 3.3 Fisiografía
- 3.4 Clima
- 3.5 Hidrografía
- 3.6 Geomorfología
- 3.7 Geología
- 3.8 Edafología
- 3.9 Uso de suelo y cubierta vegetal
- 3.10 Hidrogeología

Capítulo 4. Materiales y Métodos

- 4.1 Selección del sitio para la toma de muestra
- 4.2 Criterios seleccionados para la realización de la Caracterización del Material
- 4.3 Diseño y construcción del sistema para columnas de suelo
- 4.4 Empaquetamiento de columnas de suelo para experimentos
- 4.5 Etapa experimental (Etapas y equipo utilizado en la medición de los parámetros de control)
- 4.6 Muestras colectadas y análisis en laboratorio



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 5. Resultados y discusión

- 5.1 Selección del sitio para la toma de muestra y descripción de campo del material
- 5.2 Caracterización del material de empaque de las columnas
- 5.3 Diseño y construcción de la estructura para soporte de las columnas
- 5.4 Resultados experimentales
- 5.5 Análisis fisicoquímicos de muestras de agua en las cuatro columnas
- 5.6 Comparación de resultados de los efluentes de las cuatro columnas

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

Curriculum Vitae

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi familia.

Principalmente a mis padres, Guadalupe Hernández Galicia y Jesús Carlos Armendáriz Delgado (q.e.p.d), por haberme dado la vida, por haber estado conmigo en todo momento, por brindarme las herramientas necesarias para poder defenderme en la vida como es la educación, valores y consejos.

Sin ellos yo no sería quien soy ahora.

A mis dos hermanas, Patricia María Armendáriz Hernández y Alicia Adriana Armendáriz Hernández, por apoyarme y brindarme su amor, por ser el ejemplo de hermanas mayores y darme consejos.

A mis sobrinos, Diego Arnoldo Bautista Armendáriz, Ana Paula Cuellar Armendáriz, Leonardo Cuellar Armendáriz y a Patricio Elías Bautista Armendáriz, por su alegría, por sus ocurrencias, por sus juegos.

Agradecimientos

En primer lugar quiero mostrar mis agradecimientos en el ámbito personal, a mis familiares, sin el apoyo de ellos la consecución de esta tesis no hubiera sido posible.

A mi padre, por su carácter duro y fuerte, por su preocupación constante hacia mí, por su cariño y amor, por enseñarme a luchar y esforzarme en la vida. Gracias por darme las bases, por ser tan inteligente y transmitirme tus conocimientos, por alimentar mis ganas de conocer el mundo y explorarlo mediante los libros. Sé que estando en el cielo, estas muy orgullo de mí por la culminación de otra etapa más en mi vida.

A mi madre, por siempre estar conmigo en los momentos difíciles, por ser tan dura y a la vez tan paciente conmigo para que logre mis objetivos, por ser el impulso diario que necesito para salir adelante y con tu amor de madre siempre me facilitas las cosas, por inculcarme valores para ser una persona de bien y siempre ir por el camino correcto, te quiero mucho y te estaré eternamente agradecida en cada paso que doy.

A mis hermanas Paty y Adriana, por ser ese ejemplo de madurez que necesito y ser profesionistas, así me exigí más a mí misma para llegar a ser como ustedes, así como a mis sobrinos Diego, Ana Pau, Leo y Pato.

En el ámbito profesional, quiero agradecer de forma especial y sincera a la **Dra. María Socorro Espino Valdés**, por proponerme la realización de esta tesis de maestría, por sus consejos acerca del tema, apoyo continuo, por sus aportaciones e ideas y por convertirse en una guía para mí en la realización de esta tesis.

A mis asesores Dr. Alejandro Villalobos Aragón, Dr. Adán Pinales Munguía e Ing. Rodrigo De la Garza Aguilar por sus consejos y aportaciones en cuanto a la caracterización del material, por apoyarme con fuentes de información, por sus asesorías y recomendaciones.

A todo el equipo de personas del laboratorio de Suelos y Asfaltos de la Facultad de Ingeniería que me apoyaron en la realización de las prácticas referidas en esta tesis, así como al laboratorio de Ingeniería Sanitaria por la realización de los análisis de calidad de agua y al Servicio Geológico Mexicano.

Resumen

Se realizó un estudio cuyo propósito fue determinar el impacto de la calidad del agua que se utiliza en los procesos de recarga artificial y las implicaciones que tiene con respecto a la Modificación a la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y NORMA Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003. Se realizaron pruebas de infiltración en cinco columnas empacadas con suelo procedente de un punto cercano a la ciudad de Chihuahua ubicado en el acuífero Tabalaopa-Aldama, empleando agua de cuatro diferentes orígenes y calidades que son: Agua de lluvia, Agua del efluente de la Planta de Tratamiento Norte que pasó por un Sistema Terciario para el tratamiento de agua residual (Destilación Solar), Agua del efluente la Planta de Tratamiento Norte y Agua del efluente de la Planta de Tratamiento Sur, ambas plantas de tratamiento en la Ciudad de Chihuahua, además de un blanco de agua tridestilada. Se realizó la caracterización del material para el experimento, el diseño y construcción de una estructura capaz de soportar 5 cilindros de acrílico, la adaptación de llaves a los 5 cilindros de acrílico y la adición de cinco equipos de venoclisis en la parte superior de la estructura para la alimentación de agua al sistema las 24 horas. Posteriormente, la fase experimental comprendió tres etapas: Lavado de material de empaque en columnas de infiltración, Regulación del caudal y Pruebas de recarga con los 5 diferentes tipos de agua con descripciones diarias (por minutos y horas) del volumen de entrada y de salida, cálculo de la velocidad de infiltración y el registro de los parámetros de control como Conductividad Eléctrica, Sólidos Disueltos Totales (SDT), pH, Temperatura y Turbiedad y los análisis fisicoquímicos realizados en laboratorio (Color, DBO, Nitratos, Nitritos, SAAM, SDT, Dureza Total, F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Te, Ti, U, V, W y Zn). Los resultados obtenidos indican que los efluentes de las plantas Norte y Sur presentan una mayor concentración de color y manganeso que lo estipulado en la Norma para recarga y el F^- lo supera ligeramente en el efluente de la Planta de Tratamiento Norte. Así mismo, las concentraciones de Ca, Mg, Na, K, Cl^- , As, B, Ba, Mn, Mo, Ni, P, Sr y U presentan las mayores concentraciones de las cuatro columnas. Por lo tanto, se concluye que emplear agua de un efluente terciario de un proceso de destilación solar genera mejores resultados que de los efluentes de las Plantas de Tratamiento Norte y Sur para la aplicación en la recarga artificial.

Palabras clave: Impacto de la Calidad del Agua, Recarga artificial, pruebas de infiltración.



Índice de Contenido

Dedicatoria	vi
Agradecimientos	vii
Resumen	viii
Índice de Contenido	ix
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xii
Capítulo 1. GENERALIDADES	15
1.1 Introducción	15
1.2 Antecedentes	17
1.3 Justificación	18
1.4 Hipótesis	21
1.5 Objetivos	21
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	22
2.1 Importancia del agua subterránea como recurso	22
2.2 Recarga de acuíferos	23
2.3 Mecanismos de infiltración	25
2.4 Naturaleza y calidad del agua	27
2.5 Propiedades de las aguas residuales	29
2.6 Importancia del proceso de destilación solar para la recarga artificial de acuíferos	36
2.7 Uso de columnas de suelo para evaluar la calidad del agua resultante en pruebas de infiltración	37
Capítulo 3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	40
3.1 Localización y vías de acceso	40
3.2 Situación administrativa del acuífero	42
3.3 Fisiografía	43
3.4 Clima	45
3.5 Hidrografía	47



3.6	Geomorfología.....	48
3.7	Geología	50
3.8	Edafología	57
3.9	Uso de suelo y cubierta vegetal.....	59
3.10	Hidrogeología.....	61
Capítulo 4	MATERIALES Y MÉTODOS.....	64
4.1	Selección del sitio para la toma de muestra	64
4.2	Criterios seleccionados para la realización de la caracterización del material.....	66
4.3	Diseño y construcción del sistema para columnas de suelo.....	78
4.4	Empaquetamiento de columnas de suelo para experimentos.....	82
4.5	Desarrollo experimental.....	83
4.6	Muestras colectadas y análisis en laboratorio	86
Capítulo 5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	87
5.1	Selección del sitio para la toma de muestra y descripción de campo del material	87
5.2	Caracterización del material de empaque de las columnas.....	87
5.3	Diseño y construcción de la estructura para soporte de las columnas.....	93
5.4	Resultados experimentales.....	94
5.5	Análisis físicoquímicos de muestras de agua en las cuatro columnas.....	131
5.6	Comparación en los Resultados de las cuatro salidas de las Columnas 1, 2, 3 y 4	143
Capítulo 6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	146
	Bibliografía.....	150
	Curriculum Vitae	154



Índice de Tablas

Tabla 2-1 Estimación del balance de agua en el mundo	22
Tabla 2-2 Resumen de las características de las fuentes de abastecimiento para recarga artificial.	28
Tabla 2-3 Principales propiedades físicas del agua.	29
Tabla 4-1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S)	74
Tabla 4-2 Valores estimado de porosidad.	78
Tabla 5-1 Porcentaje de partículas que pasa por cada una de las mallas y clasificación del material.....	88
Tabla 5-2 Resultados del Coeficiente de Uniformidad Cu y Curvatura Cc	90
Tabla 5-3 Limite líquido, Limite plástico y contracción lineal.	91
Tabla 5-4 Resultados de análisis de Permeabilidad.....	92
Tabla 5-5 Resultados fisicoquímicos de la Entrada y Salida de las Columnas 1, 2, 3 y 4.....	133
Tabla 5-6 Efecto de la lixiviación en la Columna 1.....	137
Tabla 5-7 Efecto de la lixiviación de la Columna 2.....	139
Tabla 5-8 Efecto de la lixiviación Columna 3	141
Tabla 5-9 Efecto de la lixiviación Columna 4.	142
Tabla 5-10 Comparación de las Salidas de las Columnas 1,2 ,3 y 4	144

Índice de Figuras

Figura 2-1 Clasificación de mecanismos de infiltración, de acuerdo al nivel donde es recargada el agua.	26
Figura 3-1 Localización del Acuífero Tabalaopa-Aldama.....	40
Figura 3-2a Poblados más cercanos y principales vías de acceso al punto de muestreo....	41
Figura 3-3 Organismo de cuenca al que pertenece el Acuífero Tabalaopa-Aldama.	42
Figura 3-4 Contexto topográfico del Estado de Chihuahua y sus provincias fisiográficas. 43	
Figura 3-5 Topografía del Acuífero Tabalaopa-Aldama y Sierras presentes en el área.	44
Figura 3-6 Topoformas fisiográficas del Acuífero Tabalaopa-Aldama.....	45
Figura 3-7 Mapa de Climas del Acuífero Tabalaopa-Aldama.	46
Figura 3-8 Regiones Hidrológicas en el Estado de Chihuahua.	47
Figura 3-9 Red Hidrográfica del Acuífero Tabalaopa-Aldama.....	48
Figura 3-10 Geomorfología del Acuífero Tabalaopa-Aldama.	49
Figura 3-11 Geología del Acuífero Tabalaopa-Aldama.	55
Figura 3-12 Fallas, lineamientos y cronoestratigrafía del Acuífero Tabalaopa-Aldama....	56
Figura 3-13 Edafología del Acuífero Tabalaopa-Aldama.....	58
Figura 3-14 Uso de Suelo y Cubierta Vegetal del Acuífero Tabalaopa-Aldama.	60
Figura 3-15 Profundidad al nivel estático en metros del Acuífero Tabalaopa-Aldama.	62
Figura 3-16 Elevación al nivel estático en metros sobre el nivel del mar del Acuífero Tabalaopa-Aldama.	63
Figura 4-1a Obtención de la muestra en campo.	
Figura 4-1b Medición del espesor del estrato.	65
Figura 4-2 Extracción del aire atrapado en la muestra utilizando una bomba de vacío.	67
Figura 4-3 Obtención de la muestra por el método de cuarteo.....	69
Figura 4-4 Muestra representativa para la realización del análisis.	69
Figura 4-5 Cribado del material.....	69
Figura 4-6 Vaciado del líquido en la malla No. 200.	
Figura 4-7 Material secándose en la estufa.	69
Figura 4-8 Suelo humedecido en la capsula de porcelana	
Figura 4-9 Material en la Copa de Casagrande	71
Figura 4-10 Permeámetro de carga constante.	
Figura 4-11 Medición del volumen con una probeta.....	76
Figura 4-12 Vaciado de agua para saturar el material	
Figura 4-13 Material saturado con agua	77
Figura 4-14 Diseño de la estructura para 6 columnas.....	79
Figura 4-15 Estructura diseñada para el soporte de 6 columnas.	79
Figura 4-16 Altura y diámetro inferior de las 6 columnas de acrílico.	80
Figura 4-17 Diámetro superior de las 6 columnas de acrílico.....	80
Figura 4-18 Colocación de manguera de plástico para jardín de ¼ de pulgada.	81
Figura 4-19 Diseño de las 6 llaves de plástico.	81
Figura 4-20 Empacado del material	
Figura 4-21 Martillo de goma empleado para compactación.....	83
Figura 4-22 Sistema de venoclisis implementado para la alimentación de las 5 columnas de suelo	85



Figura 4-23	Medidor multiparamétrico.	
Figura 4-24	Turbidímetro Portátil.	85
Figura 5-1.	Caracterización del material.	87
Figura 5-2	Curva granulométrica del material en estudio.....	89
Figura 5-3	Curva de fluidez del suelo en estudio	91
Figura 5-4	Estructura para experimentos en columnas	
Figura 5-5	Llaves implementadas al sistema	94
Figura 5-6	Resultados de CE Y SDT, Columna 1, Etapa I.	95
Figura 5-7	Resultados de pH, Columna 1, Etapa I.	96
Figura 5-8	Resultados de CE Y SDT, Columna 2, Etapa I.	96
Figura 5-9	Resultados de pH, Columna 2, Etapa I.	97
Figura 5-10	Resultados de CE y SDT, Columna 3, Etapa I.	98
Figura 5-11	Resultados de pH, Columna 3, Etapa I.	98
Figura 5-12	Resultados de CE y SDT, Columna 4, Etapa I.	99
Figura 5-13	Resultados de pH, Columna 4, Etapa I.	100
Figura 5-14	Resultados de CE y SDT, Columna 5, Etapa I.	101
Figura 5-15	Resultados de pH, Columna 5, Etapa I.	101
Figura 5-16	Caudal de la Columna 1, Etapa II.	102
Figura 5-17	Resultados de CE y SDT, Columna 1, Etapa II.....	103
Figura 5-18	Resultados de pH, Columna 1, Etapa II.....	104
Figura 5-19	Caudal de la Columna 2, Etapa II.....	105
Figura 5-20	Resultados de CE y SDT, Columna 2, Etapa II.....	106
Figura 5-21	Resultados de pH, Columna 2, Etapa II.....	107
Figura 5-22	Caudal de la Columna 3, Etapa II.	108
Figura 5-23	Resultados de CE y SDT, Columna 3, Etapa II.....	109
Figura 5-24	Resultados de pH, Columna 3, Etapa II.....	110
Figura 5-25	Caudal de la Columna 4, Etapa II.	111
Figura 5-26	Resultados de CE y SDT, Columna 4, Etapa II.....	112
Figura 5-27	Resultados de pH, Columna 4, Etapa II.....	113
Figura 5-28	Caudal de la Columna 5, Etapa II.	114
Figura 5-29	Resultados de CE y SDT, Columna 5, Etapa II.....	114
Figura 5-30	Resultados de pH, Columna 5, Etapa II.....	115
Figura 5-31	Caudal agua de lluvia, Columna 1, Etapa III.	116
Figura 5-32	Resultados CE y SDT, Entrada Columna 1, Etapa III.	117
Figura 5-33	Resultados CE y SDT, Salida Columna 1, Etapa III.	117
Figura 5-34	Resultados de pH, Entrada Columna 1, Etapa III.....	118
Figura 5-35	Resultados de pH, Salida Columna 1, Etapa III.	119
Figura 5-36	Caudal Agua Destilador Solar Planta Norte, Columna 2, Etapa III.	120
Figura 5-37	Resultados CE y SDT, Entrada Columna 2, Etapa III.	121
Figura 5-38	Resultados CE y SDT, Salida Columna 2, Etapa III.	121
Figura 5-39	Resultados de pH, Entrada Columna 2, Etapa III.....	122
Figura 5-40	Resultados de pH, Salida Columna 2, Etapa III.	123
Figura 5-41	Caudal Agua Planta Tratamiento Norte, Columna 2, Etapa III.....	124
Figura 5-42	Resultados CE y SDT, Entrada Columna 3, Etapa III.	125
Figura 5-43	Resultados CE y SDT, Salida Columna 3, Etapa III.	125
Figura 5-44	Resultados de pH, Entrada Columna 3, Etapa III.....	126



Figura 5-45	Resultados de pH, Salida Columna 3, Etapa III.	127
Figura 5-46	Caudal Agua Planta Tratamiento Sur, Columna 4, Etapa III.	128
Figura 5-47	Resultados CE y SDT, Entrada Columna 4, Etapa III.	129
Figura 5-48	Resultados CE y SDT, Salida Columna 4, Etapa III.	129
Figura 5-49	Resultados de pH, Entrada Columna 4, Etapa III.	130
Figura 5-50	Resultados de pH, Salida Columna 4, Etapa III.	131



Capítulo 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

El agua constituye una fuente vital para la vida. Es un elemento de la naturaleza que integra los sistemas naturales, por lo que es fundamental para el sostenimiento de la vida en el planeta (Paredes, 2013). Además, el agua contribuye a la estabilidad del funcionamiento del entorno, los seres y organismos que en él habitan; es por ello que representa un bien de primera necesidad para los seres vivos y un elemento del cual no se puede prescindir en la configuración de los sistemas medioambientales. Así mismo, la sociedad recurre al agua para generar y mantener el crecimiento económico en actividades como la agricultura, industria, uso doméstico, etc. En los últimos dos siglos, debido al crecimiento exponencial de la población, que en cifras es el equivalente a 7 mil millones de habitantes, el 50% de la población vive en zonas urbanizadas (Goldewijk *et al.*, 2010), mientras que hubo expansión de la agricultura irrigada, entre diversas actividades, creando el incremento de la demanda global del recurso (Barros, 2005).

Así mismo, la urbanización, la economía y el desarrollo en la alimentación han tenido un efecto sobre el uso del agua per cápita. Por esta razón el volumen extraído de agua para las necesidades humanas ha aumentado de 500 a 4000 km³ en los últimos 100 años (Kanae *et al.*, 2006).

Existen dos problemáticas principales en relación con el agua y la sociedad; la primera es la baja disponibilidad, que genera escasez con impactos negativos para la sociedad en lo que concierne al consumo humano y producción de alimentos; la segunda se refiere a la calidad de la misma, factor que impacta definitivamente en calidad de vida de los seres humanos (Custodio, 2002; Salazar *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2013).

A causa de estos factores, muchos lugares están experimentando el problema de contaminación, agotamiento del agua subterránea, y a su vez, esto se agrava por el entorno y variaciones geográficas (Asano & Cotruvo, 2004). Además, la expansión de la agricultura de regadío en zonas áridas con precipitaciones limitadas y aguas superficiales ha provocado la dependencia casi total del agua subterránea para todos los usos (Siebert *et al.*, 2010).



Es de conocimiento común que para extraer el agua subterránea se utilizan pozos perforados a medida que se han ido agotando las posibilidades de los recursos hídricos superficiales; por ello la extracción se ha intensificado y se piensa que continuará así en el futuro. Sin embargo, estas obras de ingeniería han ido agotando el recurso y se ha visto la necesidad de recurrir a obras de recarga artificial de acuíferos como herramienta de gestión hídrica económica utilizada en países de primer mundo como Holanda, Estados Unidos, Australia, etc. (Escalante, 2005). Esto es posible mediante un conjunto de técnicas que permiten la introducción directa o indirecta de agua en el acuífero para incrementar la disponibilidad del recurso hídrico. A su vez, esto también ayuda al almacenamiento subterráneo de escorrentías superficiales no reguladas y a la reducción o eliminación del descenso piezométrico.

Por otra parte, no sólo es importante la recarga inducida al acuífero, si no que se ha visto la necesidad de aplicar alternativas para la gestión del recurso y la sostenibilidad desarrollando diversas estrategias para su conservación, recuperación y reutilización (ONU, 1987). Estos términos implican diferentes tecnologías aplicadas para el tratamiento de aguas residuales. Actualmente los usos de las aguas residuales tratadas comprenden el riego, usos urbanos e industriales y complementan los recursos de agua potable (Anderson, 2003); de este manera se coadyuva a evitar la contaminación que genera el agua residual. Otra aplicación que ha tenido auge en la década de los 90's es la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada, ya que ésta provee una alternativa a la recarga de acuíferos por procesos naturales. La infiltración inducida favorece la renovación del almacenamiento de las aguas subterráneas para una mayor recuperación o usos ambientales y así mitigar el descenso de los niveles y aumentar el suministro de agua a la población (Dillon, 2009).

La selección de esta opción ha estado impulsada por requisitos y costos ambientales más exigentes asociados al tratamiento de aguas residuales y, a su vez, en el marco adecuado de la calidad del efluente apto para descarga en cuerpos de agua y recarga de acuíferos (Vígolo *et al.*, 2018).



1.2 Antecedentes

Algunos estudios se han realizado en Brasil (Freitas *et al.*, 2012) en los que se utilizaron técnicas como la filtración y recolección de agua de lluvia. En cuanto a estas investigaciones, no todas son concluyentes debido al sellado de la superficie de las capas del suelo, la falta de monitoreo, ausencia de sitios donde aplicar los efluentes o incluso por el poco conocimiento del acuífero de interés.

Por otro lado, la realización de pruebas en columnas es una manera de evaluar la capacidad del suelo para que el efluente pueda ser tratado adicionalmente. Lewis y Sjostrom (2010) señalan que los experimentos con columnas de suelo se pueden colocar en un laboratorio o incluso en campo y permiten el monitoreo o control de la infiltración y recolección sin pérdidas causadas por la permeabilidad del material de las columnas. Así mismo, la información que se puede recopilar en una columna es la tasa de infiltración y el nivel de tratamiento del agua. A su vez, en las capas superficiales de las columnas puede existir acumulación de partículas sólidas, mientras que en las capas más profundas, sedimentos con partículas orgánicas e inorgánicas. Este método representa un proceso complejo que depende de factores físicos, químicos y/o biológicos, en el que nuevas combinaciones pueden emerger de interacciones en el suelo-agua y la atmósfera (Fernández-Escalante *et al.*, 2014). Así mismo, varios autores han estado estudiando los tipos de obstrucción que pueden existir y técnicas de atenuación para este problema (Andelman *et al.*, 1994).

En 1989 la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó las Guías sobre el uso Seguro de Aguas Residuales en la Agricultura y Acuicultura, mismas que han repercutido en el reuso racional de aguas residuales en todos los países. Aunado a lo anterior, se agregó un nuevo concepto como lo es la recarga de aguas subterráneas, el cual es aún más estricto en el documento que se encuentra en preparación: Health Aspects of Aquifer Recharge with Reclaimed Water (Aspectos de salud derivados de la recarga de acuíferos con agua recuperada) (WHO, 2019).

En México existen normatividades como la NOM-014-CONAGUA-2003 y la NOM-015-CONAGUA-2007 para la gestión de la recarga de acuíferos. La primera tiene como objetivo la gestión de las aguas subterráneas con estrategias integrales que incluyen el manejo



de la demanda, el reúso y la aplicación de tecnología para la recarga artificial para preservar e incrementar la reserva de agua subterránea, mientras que la segunda tiene como objetivo principal la protección de la calidad del agua de los acuíferos y el aprovechamientos del agua de pluvial y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad del agua mediante límites establecidos para algunos parámetros como: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, nitrógeno total, etc.

Hay que mencionar además que el agua superficial que no ha transitado por zonas potenciales de contaminación puede ser aplicada directamente de forma artificial sin restricción en cuanto a su calidad, mientras que la recarga artificial con aguas residuales puede provocar deterioro de la calidad del agua subterránea y daños a la salud pública. Teniendo en cuenta lo anterior, si se pretende recuperar el agua de recarga para consumo humano o que ésta migre hasta captaciones que suministren agua para este uso, debe cumplir los parámetros establecidos en la NOM-014-CONAGUA-2003 y la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

En el estado de Chihuahua existe una cobertura del 79% del agua residual proveniente del alcantarillado y que es tratada en las plantas de tratamiento de esta entidad (Peña *et al.*, 2013). En la ciudad de Chihuahua se encuentran 2 plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en el norte y sur de la ciudad, cuyos caudales tratados corresponden a 430 l/s y 1620 l/s, respectivamente (CONAGUA, 2017).

A la fecha no se conoce la existencia de un estudio sobre calidad del agua que estaría llegando a combinarse con el agua subterránea, en caso de que se realizaran obras de recarga superficial empleando agua tratada procedente de las plantas mencionadas.

1.3 Justificación

Actualmente, el tema de la disponibilidad de agua ha tomado gran relevancia debido a la problemática de abastecimiento de agua en la región norte del país (Alarcón *et al.*, 2012). Esta situación se encuentra íntimamente relacionada con el crecimiento de la población en los últimos 40 años. Es sabido que la disponibilidad del vital líquido es esencial para la vida y



para las diversas actividades productivas como la ganadería, agricultura, industria, uso doméstico, etc., y éstas, a su vez, se encuentran estrechamente ligadas con la posibilidad de desarrollo de una ciudad. Así mismo, los organismos gubernamentales deben proveer y asegurar el abasto del agua a las ciudades, respetando así el derecho al agua que toda persona tiene; sin embargo dicha obligación no se limita al suministro en cantidad, sino también con una buena calidad de la misma, tanto en sus propiedades físicas como químicas y biológicas.

Así mismo, Chihuahua, es un estado que por su situación geográfica no se encuentra favorecido hidrológicamente, ya que posee un clima árido extremoso en gran parte del territorio, con sequías prolongadas, y un alto porcentaje del agua disponible para consumo humano tiene su origen en aguas subterráneas.

Dentro de la problemática estatal se encuentra la de la ciudad de Chihuahua, en la cual el 99% del agua destinada al consumo humano procede del subsuelo, principalmente de tres acuíferos (Tabalaopa-Aldama, Chihuahua-Sacramento y El Sauz-Encinillas), mismos que se encuentran en la lista de acuíferos sobreexplotados (CNA, 2010). Como se ha dicho, la alternativa más viable para la recuperación de los mismos consiste en la aplicación de técnicas de recarga artificial mediante obras hidráulicas que favorezcan la infiltración de agua de lluvia y de escorrentía superficial. Sin embargo, ante la notable escasez de las fuentes naturales de agua para recarga, es posible considerar como una alternativa que pudiera ser significativa la de utilizar los efluentes de las Plantas Norte y Sur de tratamiento de aguas residuales de la ciudad. Dichas plantas operan mediante el proceso de lodos activados que corresponde a un tratamiento secundario; la calidad de estos efluentes cumple con los requerimientos para reuso en actividades que no implican contacto directo, como es el riego agrícola y de áreas verdes. Sin embargo, dicha calidad se pone en duda en cuanto a la posibilidad de cumplir con los parámetros requeridos para su aplicación en la recarga de acuíferos que son utilizados para abastecimiento público, cuyos resultados finales pudieran tener una repercusión en la salud de los consumidores.

Debido al nivel del tratamiento, en los efluentes de estas plantas persiste materia orgánica que varía en proporción y estado a causa de residuos de animales o vegetales presentes en las aguas residuales que son sometidas a los tratamientos primario y secundario; aunado a esto existe la presencia de bacterias y virus patógenos encontrados en algunas trazas



orgánicas, lo cual bajo ciertas características hidrogeológicas del medio podrían reducir la calidad del agua subterránea si dichos efluentes fueran vertidos directamente. A causa de lo anterior, se deben considerar estos factores al realizar una recarga inducida en acuíferos y asegurar una calidad óptima del agua en los sistemas hasta la entrega del consumidor, así como establecer un eficaz control sanitario del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano, acorde a las necesidades actuales.

El presente trabajo pretende elaborar un experimento en donde se simule un proceso de infiltración con agua de diferentes calidades a través de un material representativo de una porción del acuífero Tabalaopa-Aldama en donde se analicen 5 situaciones diferentes: ¿Qué pasa con el agua residual tratada en las plantas Norte y Sur al pasar por el material previamente caracterizado y de porosidad conocida?; ¿Qué pasa con el agua residual tratada que previo al experimento de infiltración fue sometida a un proceso de destilación solar?, ¿Qué sucede con el agua de lluvia al infiltrarse por el material? y por último ¿Qué sucede cuando se pasa agua destilada por el material? . La respuesta se obtuvo al comparar los resultados de dichos procesos con los lineamientos establecidos en la NOM-014-CONAGUA-2003, que incluyen los de la Norma Oficial Mexicana para agua destinada al consumo humano (Modificación a la NOM-127-SSA1-1994).



1.4 Hipótesis

En las actividades de recarga artificial de acuíferos mediante infiltración, el empleo de un efluente terciario de un proceso de destilación solar genera mejores resultados de calidad de agua que los efluentes secundarios de plantas de tratamiento de aguas residuales.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Realizar pruebas de infiltración en columnas empacadas con suelo procedente de un punto cercano a la ciudad de Chihuahua ubicado en el acuífero Tabalaopa-Aldama, empleando agua de cuatro diferentes orígenes y calidades, a fin de comparar el impacto del tipo de agua utilizado en los procesos de recarga artificial y sus implicaciones de carácter normativo.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Colectar muestras de suelo y efectuar su caracterización granulométrica.
2. Implementar un sistema de columnas empacadas con suelo para realizar pruebas de infiltración de agua.
3. Colectar agua de diferentes orígenes (agua totalmente desmineralizada, agua de lluvia, efluentes secundarios de dos plantas de tratamiento de aguas residuales y el efluente terciario de un sistema de destilación solar) para realizar pruebas de infiltración en el sistema de columnas empacadas.
4. Comparar los resultados del proceso de infiltración empleando diferentes tipos de agua con los requerimientos normativos existentes para la recarga artificial de acuíferos.



Capítulo 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Importancia del agua subterránea como recurso

El agua subterránea es el agua contenida en la zona de saturación del subsuelo. Por lo que se refiere a la zona de saturación podría considerarse similar a un embalse natural o sistema de embalses cuya capacidad total es equivalente al volumen conjunto de los poros o aberturas de las rocas que se encuentran llenas de agua. Así mismo, el agua subterránea se encuentra en forma de un solo cuerpo continuo o de varios cuerpos separados. El espesor de la zona de saturación es variable (desde unos cuantos metros hasta kilómetros), dependiendo de la geología local, la presencia de los intersticios en las formaciones, la recarga y el movimiento o desplazamiento del agua desde las áreas de recarga hasta las de descarga (Serieys, 2004).

En la Tabla 2-1, se muestra la principal motivación para el estudio del agua subterránea que es su importancia como recurso. Si no se toman en cuenta los océanos (por los altos niveles de salinidad), el agua subterránea representa aproximadamente 2/3 del agua dulce del mundo. Si se toma en cuenta sólo el agua utilizable, es decir, se desprecian las capas de hielo, glaciares y las aguas de la atmósfera y de la biosfera, el agua subterránea representa el 95%, los lagos, pantanos, presas y ríos el 3.5% y la humedad del suelo 1.5% (Gutiérrez, 2016).

Tabla 2-1 Estimación del balance de agua en el mundo (Gutiérrez, 2016)

Parámetro	Área (Km ²)x 10 ⁶	Volumen (Km ³) x 10 ⁶	Volumen (%)	Tiempo de residencia
Océanos y lagos	361	1370	94	4000 años
Lagos y presas	1.55	0.13	<0.01	10 años
Pantanos	<0.1	<0.01	<0.01	1-10 años
Ríos	<0.1	<0.01	<0.01	2 semanas
Humedad del Suelo	130	0.07	<0.1	2 semanas - 1 año
Agua Subterránea	130	60	4	2 semanas - 10,000 años
Hielo y glaciares	17.8	30	2	10 - 1,000 años
Agua atmosférica	504	0.01	<0.01	10 días
Agua de la biosfera	<0.1	<0.01	<0.01	1 semana
Suma		1460		

Por otro lado, el agua subterránea es un recurso natural vital para el suministro económico y seguro de agua potable en el medio urbano y rural, y juega un papel fundamental en el bienestar del ser humano y de muchos ecosistemas acuáticos (Foster *et al.*, 2002).



El agua subterránea es muy importante, ya que representa la única fuente de abastecimiento en muchas regiones áridas del planeta que carecen de ríos o lagos perennes (Vasanthavigar *et al.*, 2011).

Las ventajas del agua subterránea sobre las fuentes de abastecimiento superficial son: menor riesgo de contaminación por actividades del hombre, ya que presenta mejor calidad debido a procesos de filtración natural en el subsuelo (en la mayoría de los casos), así como menor riesgo a alteraciones y mayores capacidades de almacenamiento sin comprometer áreas en la superficie (Saldierna *et al.*, 2014).

Actualmente, la sequía es uno de los problemas que mas daños está provocando en la sociedad mexicana, principalmente en el norte del país, donde históricamente se presenta dicho fenómeno meteorológico. La sequía se define como la disminución o la ausencia de precipitaciones pluviales respecto al índice anual, lo que conlleva a la disminución en la cantidad de agua existente y disponible para el abasto humano y desencadena en una serie de dificultades derivadas de la escasez del líquido (Esparza, 2014). Lo dicho hasta aquí supone que en el norte del país existe una dependencia casi total al agua subterránea.

En el caso particular del estado de Chihuahua, se estima que el 60% del volumen total de agua empleado proviene de fuentes subterráneas (CNA, 2010), es por ello que tiene una importancia destacada en la entidad para el abastecimiento del agua a la población y el uso agrícola.

Todo lo anterior expuesto reafirma la necesidad de buscar alternativas para gestionar el recurso, localizar fuentes alternas de abastecimiento o la implementación de nuevas tecnologías.

2.2 Recarga de acuíferos

2.2.1 Recarga Natural

El fenómeno de la recarga natural puede ocurrir en los ríos, embalses, lagunas o también con flujos subterráneos provenientes de cuencas adyacentes. Dependiendo de la pendiente del terreno, de su cobertura vegetal, de la temperatura y de la permeabilidad del suelo, las precipitaciones reabastecen los acuíferos por percolación. Así mismo, el tiempo de viaje del agua hasta los acuíferos depende de la conductividad hidráulica de las capas



geológicas en las cuales el agua está fluyendo. Los procesos de recarga natural son generalmente muy lentos (Serieys, 2004). Por lo tanto, la explotación del agua subterránea a una tasa mayor de la cual puede reponerse causa el abatimiento de los niveles freáticos o piezométricos (Gutiérrez, 2016). Considerando lo anterior, se requieren medidas donde las actividades humanas se vean involucradas para así para evitar el minado del agua subterránea.

2.2.2 Actividades humanas que favorecen la recarga de acuíferos

1. **Recarga no intencional.** Se debe la infiltración profunda del agua de riego o las fugas de las tuberías de abastecimiento de agua potable y del drenaje (Gutiérrez, 2016).
2. **Recarga no controlada.** Incluye a los pozos utilizados para el drenaje del agua de las tormentas, las filtraciones de los tanques sépticos, generalmente utilizados para la disposición de agua no requerida y generalmente sin tratamiento previo (Gutiérrez, 2016).
3. **Recarga controlada o artificial.** Se efectúa a través de estructuras diseñadas exprofeso para recargar acuíferos como pozos de inyección, embalses de infiltración y galerías que permiten introducir agua a los acuíferos provenientes de la lluvia, agua residual tratada, ríos, agua de otros acuíferos, agua que posteriormente es recuperada para todo tipo de usos (Gutiérrez, 2016).

Este último concepto representa una medida de mitigación al uso no sustentable del agua subterránea y es el que se utiliza para evitar el agotamiento de los mantos de agua potable.



2.2.3 Recarga artificial de acuíferos

La recarga artificial se define como el proceso de abastecer de agua a una formación acuífera mediante obras hechas especialmente para este propósito aumentando las tasas naturales de infiltración. La Gestión de la Recarga de Acuíferos (GRA) y la captación de agua de lluvia han sido practicadas por siglos en regiones áridas y semiáridas del mundo, utilizando una amplia variedad de técnicas (Gutiérrez, 2016).

La recarga artificial permite disminuir el descenso de los niveles freáticos de zonas con balance hídrico negativo, aumentar la conservación del agua y mejorar la calidad de la misma, almacenar agua en épocas húmedas, prevenir o detener la subsidencia del suelo, reducir el escurrimiento superficial y la erosión del suelo (Serieys, 2004; Gutiérrez, 2016).

Por otro lado, existen desafíos dentro de los proyectos de recarga artificial tales como: obstrucciones en la superficie, la necesidad de la limpieza de las áreas de infiltración, agua resultante en el acuífero de baja calidad, pérdidas de agua por infiltración debido a fallas geológicas no conocidas o mal identificadas, entre otras. Considerando lo anterior descrito, es necesario empezar por un proyecto piloto y después proceder a su implementación a escala mayor.

2.2.3.1 Recarga de acuíferos mediante el uso de agua residual tratada

Como se ha dicho, la necesidad de búsqueda de alternativas en tiempos de escasez ha vuelto la mirada al reúso de aguas residuales como un componente fundamental en la gestión sostenible e integrada de los recursos hídricos.

El agua residual tratada es un medio usual para la irrigación de campos agrícolas del entorno urbano, áreas verdes urbanas, y recientemente como un medio importante para ser utilizado en la recarga de acuíferos como ocurre en diversas ciudades en Estados Unidos y China, entre otras ciudades en el mundo (Gale, 2005).

2.3 Mecanismos de infiltración

Según la clasificación de Bouwer (2002) existen 3 mecanismos de infiltración: superficial, en la zona vadosa e infiltración directa al acuífero (Figura 2-1).

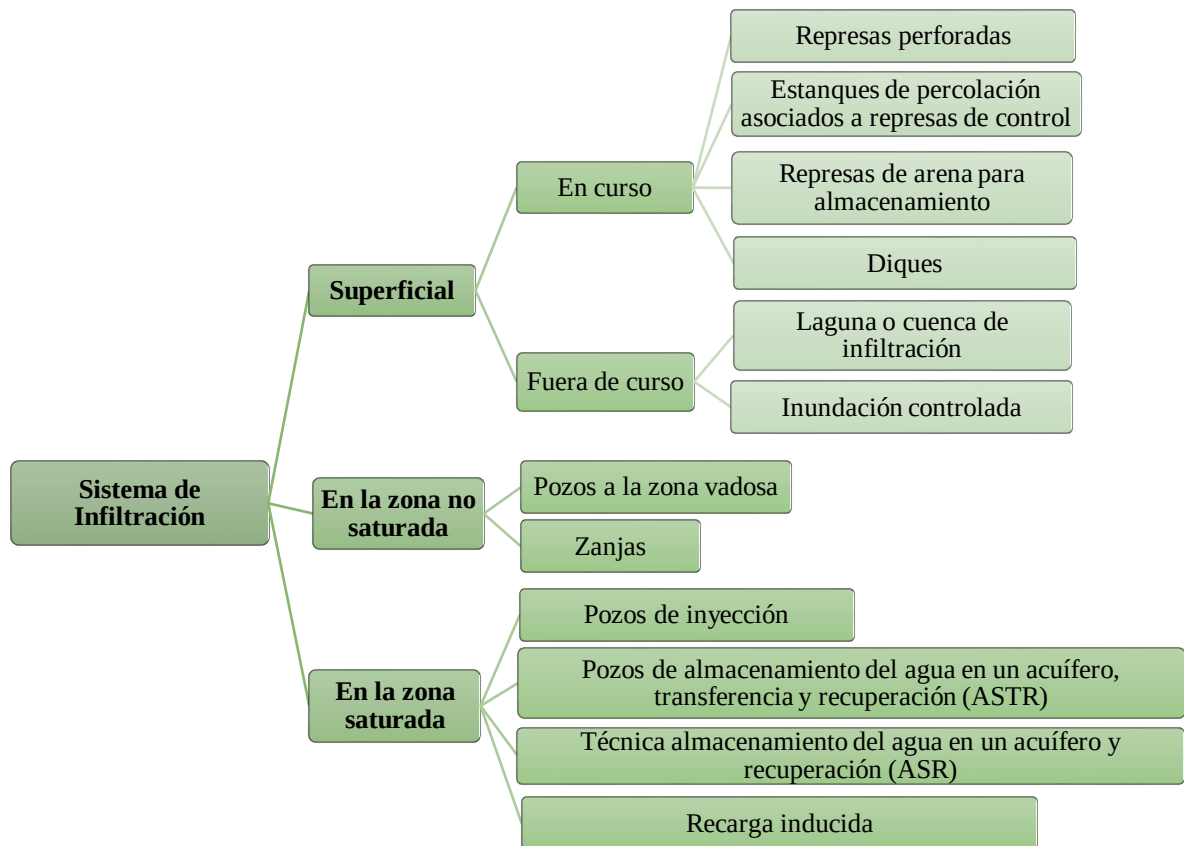


Figura 2-1 Clasificación de mecanismos de infiltración, de acuerdo al nivel donde es recargada el agua.
Fuente: Moreno, 2015

2.3.1 Infiltración superficial

Bouwer (2002) señala que los sistemas de infiltración superficial se dividen en: sistemas en curso y sistemas fuera de curso. Los primeros consisten en presas colocadas a través de las corrientes efímeras y perennes, para respaldar el agua y difundirla; así se incrementa el área de inundación de la planicie, y por lo tanto más agua se infiltra en el suelo. Los segundos consisten en cuencas de infiltración especialmente construidas, lagunas, tuberías perforadas o alguna otra instalación donde el agua se dispone sobre el terreno para su infiltración dentro del suelo.

Los sistemas de infiltración superficial, normalmente, requieren suelos superficiales permeables para conseguir altas tasas de infiltración. La zona vadosa debe estar libre de capas de arcilla u otros materiales de textura fina que restrinjan el flujo descendente. Así mismo, los acuíferos deben ser transmisivos para acomodar el flujo lateral del agua infiltrada, lejos



del área de recarga. También, los suelos, las zonas vadasas y los acuíferos deben estar libres de contaminantes que se puedan ser transportados por el agua y trasladados a otros acuíferos y otras áreas (Bouwer, 2002).

2.3.2 Infiltración en la zona no saturada

Donde el suelo no es lo suficientemente permeable, o donde no existe suficiente terreno para sistemas superficiales de infiltración, la recarga del agua subterránea también puede ser llevada a cabo con sistemas de infiltración verticales, tales como zanjas o pozos en la zona vadosa (Bouwer, 2002). La principal ventaja de las zanjas o pozos de recarga en la zona vadosa es que son relativamente baratos, sin embargo, la desventaja es que, eventualmente, se colmatan debido a la acumulación de biomasa y/o partículas suspendidas. Para minimizar la colmatación, el agua debe ser pretratada para remover sólidos suspendidos (Bouwer, 2002).

2.3.3 Infiltración en la zona saturada

La recarga directa a través de pozos en la zona saturada se realiza donde no existe disponibilidad de suelos permeables y/o de suficiente terreno para una superficie de infiltración, donde la zona vadosa no es apta para pozos o zanjas, y donde los acuíferos son profundos y/o confinados. En realidad, los acuíferos confinados pueden aún ser recargados, ya que ellos aceptan y ceden agua por expansión y compresión del acuífero mismo y de capas intercaladas de arcilla y acuitardos que son más comprimibles que las arenas, gravas y materiales consolidados de los acuíferos (Bouwer, 2002).

2.4 Naturaleza y calidad del agua

2.4.1 Naturaleza

Por lo que se refiere a la calidad del agua en un proyecto de recarga se debe establecer, por un lado, la naturaleza de las aguas que serán infiltradas al acuífero, ya sean aguas superficiales, de escorrentía de tormentas, residuales o potables. Además, es necesario conocer a calidad fisicoquímica de la misma.



En la Tabla 2-2 se presenta un resumen de las características de las principales fuentes de agua.

Tabla 2-2 Resumen de las características de las fuentes de abastecimiento para recarga artificial.
Fuente: Jiménez (2013)

Fuente	Disponibilidad	Calidad
Agua superficial	Variable pero predecible en el caso ríos. Constante en lagos.	Ríos podrían contener carga importante de sólidos suspendidos (SS) o contaminantes. En lagos el agua podría ser recargada directamente.
Escorrentía de tormenta	Incierta y espaciada temporalmente.	En general sólo requiere remoción de sólidos suspendidos.
Agua residual	Constante y predecible.	Requiere tratamiento secundario o terciario dependiendo del uso del agua recargada.
Agua potable	Constante y predecible.	Calidad óptima, no requiere tratamiento.

2.4.2 Calidad del agua para recarga

Las exigencias de calidad para las aguas utilizadas en un proyecto de recarga artificial son diferentes de acuerdo a su origen. Si se trata de un proyecto que infiltra aguas naturales, la NOM-014-CONAGUA-2003, que define los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada, establece que el agua meteórica y la superficial que no han transitado por focos potenciales de contaminación pueden ser aplicadas a la recarga artificial sin restricciones en cuanto a su calidad. Por el contrario, si se trata de aguas residuales, sólo se podrá infiltrar si tiene una calidad tal que no deteriore la calidad del agua subterránea nativa o que sea factible su tratamiento para prevenir riesgo de contaminación. Una apropiada gestión de recarga artificial de agua necesita contemplar ciertos parámetros como cumplir en relación con la calidad del agua, operación y el monitoreo utilizados en los sistemas de recarga artificial con agua residual tratada. Por lo que se refiere a la calidad del agua, dicha norma hace referencia a la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 que establece como requisito el cumplimiento de los límites máximos permisibles de características microbiológicas, físicas y organolépticas, químicas y radioactivas para el agua



de consumo humano. Así mismo, esta última norma señala los tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización previo a la recarga.

2.5 Propiedades de las aguas residuales

2.5.1 Propiedades físicas

Las principales propiedades físicas de un agua residual son su contenido de sólidos, color, olor, turbiedad, temperatura y se enlistan en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Principales propiedades físicas del agua. Fuente: Espino (2016); Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua (s.f.)

Propiedad Física	Descripción	Procedencia
Sólidos	El contenido de sólidos es uno de los parámetros más significativos. La cantidad, el tamaño y el tipo de sólidos depende del agua específica. En aguas residuales no tratadas pueden tener sólidos en el rango de milímetros. Existen varias clasificaciones de los sólidos en agua y se denominan de la siguiente forma: Sólidos totales (ST), Sólidos suspendidos (SS), Sólidos totales disueltos, STD= ST -SS, Sólidos totales volátiles (STV) y Sólidos suspendidos volátiles (SSV).	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas.
Color	El color en aguas residuales es producido por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por el total de los sólidos, incluidos los suspendidos, se llama color aparente, mientras que el color causado por sustancias coloidales y disueltas se denomina color verdadero y se obtiene de una muestra filtrada. Dado que la medida depende del tamaño del poro del filtro, se debe especificar el tipo de filtro usado y tamaño del poro.	Aguas residuales domésticas e industriales, degradación natural de materia orgánica.
Olor	El sulfuro de hidrógeno (H_2S) comunica a las aguas residuales un olor desagradable. El umbral del olor se determina al diluir una muestra en agua sin olor hasta que se detecta un olor perceptible. Este ensayo tiene cierto alcance subjetivo, ya que el umbral del olor puede variar de una persona a otra. El aparato que se utiliza para medir este parámetro se conoce como odorímetro.	Agua residual en descomposición, residuos industriales.
Turbiedad	La turbiedad del agua es causada por la presencia de la materia en suspensión y coloidal, la cual se dispersa y absorbe la luz. La turbiedad se mide mediante comparación visual con suspensiones estándar de la turbiedad en unidades SiO_2 . Los resultados de las mediciones de turbiedad se dan en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).	Procedente de sedimentos, materia orgánica e inorgánica (plantas de tratamiento).
Temperatura	La temperatura del agua es un parámetro importante porque afecta directamente a las reacciones químicas y las velocidades de reacción. En los sistemas de tratamiento de aguas residuales la temperatura puede también ser significativa ya que por encima de $36^{\circ}C$ las colonias de microorganismos aerobios tienden a reducir su poder de eliminación de la suciedad o impurezas.	Aguas residuales domésticas e industriales.



2.5.2 Propiedades químicas

Las impurezas, por el lado de las características químicas, deben su origen a contaminantes orgánicos e inorgánicos. Los contaminantes orgánicos dan como resultado la disminución del oxígeno, producto de la degradación biológica de los compuestos. En el caso de los contaminantes inorgánicos, el resultado es su posible efecto tóxico (Lecca & Lizama, 2014).

2.5.2.1 Propiedades químicas orgánicas

La materia orgánica en un agua residual proviene exclusivamente de la actividad humana y está compuesta por materia carbonácea, proteínas y grasas. Las proteínas constituyen del 40 al 50% de la materia orgánica y están representadas por los complejos de aminoácidos y proporcionan la mayor parte de los nutrientes bacterianos. Aproximadamente un 50-60% de las proteínas se encuentran disueltas en las aguas residuales y un 20-30% en la fracción sedimentable. La materia carbonácea está representada por los hidratos de carbono que a su vez están constituidos por los almidones, los azúcares y la celulosa; de esta materia carbonácea, los dos primeros son fácilmente degradables. Los porcentajes de hidratos de carbono que se encuentran en forma disuelta y sedimentable son semejantes a las proteínas. Las grasas incluidas en los ácidos grasos no suelen ser solubles y se degradan lentamente (Rojas, 2002).

Como se ha dicho, existe una vasta composición de constituyentes que integran la materia orgánica de las aguas residuales; es por ello que se han estandarizado dos técnicas analíticas para cuantificar de manera general los constituyentes orgánicos biodegradables y aquellos que presentan un carácter refractario.

1. **Demanda Química de Oxígeno (DQO).** Es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación química de la materia orgánica. Esta prueba proporciona un medio indirecto de la concentración de materia orgánica en el agua residual (Rojas, 2002).
2. **Demanda Bioquímica de Oxígeno en cinco días (DBO₅).** Es la cantidad de materia orgánica fácilmente biodegradable durante cinco días y a 20°C y



corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar biológicamente la materia orgánica. La relación DQO/DBO₅ proporciona una indicación de la biodegradabilidad de las aguas residuales (Rojas, 2002).

2.5.2.2 **Propiedades químicas inorgánicas de las aguas residuales y subterráneas**

Las aguas residuales y naturales contienen varios componentes inorgánicos de gran importancia para el establecimiento y control de la calidad del agua. Lo cual hace conveniente examinar su naturaleza puesto que las concentraciones de los distintos constituyentes inorgánicos pueden afectar mucho a los usos del agua.

Como parámetros a tener en cuenta se incluyen elementos y compuestos como calcio (Ca) y magnesio (Mg) que proporcionan dureza, cloruro (Cl⁻), fierro (Fe), cromo (Cr), nitratos (NO₃⁻) y sulfatos (SO₄⁻²). Por otro lado, los constituyentes químicos orgánicos de mayor interés comprenden nutrientes, constituyentes no metálicos y gases. Entre los nutrientes inorgánicos se encuentran el amoníaco libre, nitrógeno orgánico, nitratos, nitritos y el fósforo inorgánico y orgánico. Conviene subrayar que el nitrógeno y el fósforo son de gran importancia, ya que son identificados como nutrientes que causan el crecimiento indeseable de las plantas acuáticas (Crites *et al.*, 2000).

Por otra parte, algunos parámetros como el potencial de hidrógeno (pH), alcalinidad y acidez, cloruros, sulfatos y la conductividad eléctrica son importantes para estimar la capacidad de reutilización de aguas residuales tratadas y tienen un amplio uso en relación a la calidad del agua, sea potable o residual. Las pruebas para metales pesados y para otros constituyentes son usadas para estimar la capacidad de digestión de biosólidos y el compostaje de lodos en aplicaciones sobre el suelo.

- 1. Potencial de hidrógeno (pH).** El pH se define como el log negativo (en base 10) de la concentración de ion hidrógeno y es adimensional. El pH de la mayoría de las aguas minerales está entre 6 y 9. El pH permanece constante a menos que la calidad del agua cambie debido a las influencias de tipo natural o antropogénicas, aumentando la acidez o la basicidad. Por otro lado, es importante que el impacto



antropogénico (por ejemplo, las descargas de efluentes) sea minimizada (Espino, 2016).

2. Alcalinidad y acidez. La alcalinidad es la capacidad para aceptar los iones H^+ , es una medida de la capacidad neutralizadora ácida y se describe generalmente como la capacidad amortiguadora. Por su parte, la acidez es una medida de la capacidad neutralizadora de una base. A partir del sistema carbonato, las siguientes especies de carbonato contribuyen a la alcalinidad en cantidades relativas:

- Hidróxido, OH^- . Ocasionalmente ocasionan más alcalinidad.
- Ion carbonato, CO_3^{2-} . Las aguas con concentraciones bajas en carbonato suelen ser ácidas y no es común encontrar este ion en el agua.
- Ion bicarbonato, HCO_3^- . Los bicarbonatos predominan entre pH 6.5 – 8.5 y hablan de un agua de buena calidad.
- Dióxido de carbono, CO_2 . El dióxido de carbono se encuentra en áreas más cerca de la montaña (plantas) donde hay interacción agua, suelo y gases. El bicarbonato se debe al CO_2 que existe en el suelo (gas) (Espino, 2016).

3. Dureza. La dureza se expresa principalmente por la suma de los cationes metálicos divalentes Ca^{2+} y Mg^{2+} . Así mismo, los iones que provocan la dureza tienen su origen en el suelo en rocas como calizas $CaCO_3$ y dolomías $CaMg(CO_3)_2$. Sin embargo, existen otras especies iónicas dominantes, todas responsables de la dureza entre las que destacan cationes como Si^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} combinados con aniones tales como $HCO_3^- + CO_3^{2-}$, SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- y SiO_3^{2-} . En menor grado Al^{3+} y Fe^{3+} son considerados como iones causantes de la dureza.

El agua dura requiere demasiado jabón para la formación de espumas y crea depósitos sobre las superficies con las cuales entra en contacto. El valor de la dureza determina, por tanto, su conveniencia para uso doméstico o industrial y la necesidad de un proceso de ablandamiento (Espino, 2016).



4. **Conductividad Eléctrica.** La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar la corriente eléctrica. La corriente eléctrica es conducida en la solución mediante el movimiento de los iones y así cuanto mayor es el número de iones, es decir, mayor la concentración de sales disueltas, mayor es la movilidad iónica y, en consecuencia mayor es la magnitud de la conductividad.

Con respecto a la química, el agua pura no conduce la corriente eléctrica debido a que los únicos iones presentes son el H^+ y el OH^- en bajas concentraciones y por ello la conductividad del agua muy pura es aproximadamente $0.05 \mu S/cm$. Por otra parte, el agua de mar con alto contenido de sales tiene una conductividad de aproximadamente $40,000 \mu S/cm$ (Espino, 2016).

5. **Cloruros.** Los cloruros (Cl^-) forman sales muy solubles y estables en disolución. En general va asociado al Na^+ (Espino, 2016). Los cloruros proceden de la disolución de suelos y rocas que los contienen. Otra fuente de cloruros es la descarga de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales en las aguas superficiales (Ramalho, 1991).
6. **Sulfatos.** Sus sales varían desde moderadamente solubles hasta muy solubles. Precipita principalmente como $CaSO_4$. En medios reductores (anaerobios) con abundante materia pueden sufrir reducción bacteriana, pero en general es estable. En el agua subterránea su origen puede deberse al lavado de terrenos en zonas muy áridas y/o actividades urbanas, industriales y agrícolas (Espino, 2016).
7. **Nitrógeno.** Este es uno de los componentes básicos de las proteínas y en el agua lo usan los productores primarios en la producción de células. La mayor cantidad de nitrógeno se encuentra en la atmósfera, 78% en volumen. En el ciclo del nitrógeno se aprecia que este elemento alterna sus formas inorgánica y orgánica. Así mismo, algunas plantas tienen la capacidad de fijar el N_2 y convertirlo a nitratos.



Por otro lado, el amoníaco se emplea para obtener fertilizantes. En un medio acuoso, el nitrógeno disuelto (N_2) puede fijarse mediante las algas y algunas bacterias. El nitrógeno puede introducirse en las aguas subterráneas mediante las aguas residuales que contienen proteínas y otros compuestos de nitrógeno.

Como ya se ha señalado, el nitrógeno se introduce en el ambiente acuático por la descarga de aguas residuales domésticas y residuos industriales orgánicos. Los componentes principales son nitrógeno orgánico (proteínas) y amoníaco. En el proceso de tratamiento éstos se pueden oxidar parcialmente a nitritos y nitratos. El nitrito NO_2^- es un compuesto de transición en el ciclo del nitrógeno y tiende a ser inestable. Los nitratos NO_3^- en agua potable son dañinos para infantes (Espino, 2016).

- 8. Fósforo.** Este elemento es indispensable para el crecimiento de los organismos vivos. Puesto que todos los procesos vitales requieren fósforo, el sistema biológico reduce aún más la concentración del mismo en aguas naturales.

La aportación de fósforo por actividades humanas puede ser mayor que la de las fuentes naturales. Las aguas negras domésticas contienen fósforo de las heces y los detergentes comerciales, en los cuales utilizan fosfatos. Por consiguiente el fósforo soluble puede alcanzar concentraciones altas en ciertas aguas contaminadas. Este fósforo, en muchos casos da origen al crecimiento de organismos perjudiciales, como las algas filamentosas que causan problemas de sabor y olor al agua (Espino, 2016).

- 9. Azufre.** Se presenta como ion sulfato en la mayoría de los suministros de agua residual. También, el azufre se requiere en la síntesis de las proteínas y se libera en su degradación.

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) puede ser oxidado biológicamente a ácido sulfhídrico, el cual es corrosivo para las tuberías del alcantarillado y los sulfatos son reducidos a sulfuros en los digestores de fangos (Ramalho, 1991).



10. Compuestos tóxicos. El Cobre (Cu), Plomo (Pb), Plata (Ag), Cromo (Cr), Arsénico (As), Boro (B) y el ion fluoruro son tóxicos en distintos grados para los microorganismos.

En los vertidos industriales encontramos también algunos aniones tóxicos, incluyendo cianuros y cromatos. Se encuentran principalmente en los efluentes de fábricas de recubrimientos electrolíticos y deben ser eliminados en la propia fábrica mediante pretratamientos adecuados antes de mezclarse con el agua residual municipal (Ramalho, 1991).

11. Metales. En el agua subterránea natural la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Algunos de estos iones están presentes casi siempre y en mayor cantidad, por lo que se les llama iones fundamentales. A continuación se enlistan los cationes más importantes:

- **Sodio (Na^+).** Es altamente soluble (difícilmente precipita). Esta generalmente asociado al Cloruro (Cl^-). En altas concentraciones perjudican a las plantas ya que reducen la permeabilidad del suelo. Su origen se debe a la disolución de evaporitas y contaminación urbana e industrial.
- **Potasio (K^+).** Posee una solubilidad muy alta y es difícil de precipitar. Es fijado por el terreno. Se adsorbe en forma muy poco reversible por arcillas en formación. No presenta problemas a las concentraciones habituales y es un elemento vital para las plantas. Su origen se debe a algunos silicatos (como micas y arcillas) y la contaminación industrial, minera y agrícola.
- **Iones relacionados con el hierro (Fe).** Pueden existir en los estados de valencia +2 y +3. La estabilidad de los iones depende el pH. En general las aguas subterráneas sólo tienen Fe^{++} disuelto. Ciertos microorganismos promueven medios reductores que favorecen la formación de Fe^{++} mientras otros utilizan la energía del paso de Fe^{++} a Fe^{+3} en sus procesos vitales. Estos crecimientos bacterianos se favorecen en la oscuridad. Su



origen en aguas subterráneas se debe a las rocas sedimentarias o al entubado de pozos.

En cuanto al resto de iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente más pequeñas que los anteriores (menos del 1% del contenido iónico total) y se llaman iones menores entre los que se encuentran el hierro (Fe^{+3}), manganeso (Mn^{+2}), aluminio (Al^{+3}) y estroncio (Sr^{+2}).

Los iones metálicos derivados del antimonio (Sb), bario (Ba), vanadio (V), uranio (U), níquel (Ni), cadmio (Cd), zinc (Zn), etc., normalmente están presentes en cantidades traza y son importantes constituyentes en muchas aguas. Algunos de ellos son necesarios para el desarrollo de la vida biológica. Además, la presencia de cualquiera de estos metales en cantidades excesivas interferirá en muchos usos provechosos del agua debido a su toxicidad (Espino, 2016; Ramalho, 1991).

2.6 Importancia del proceso de destilación solar para la recarga artificial de acuíferos

Como se ha dicho, el agua es un factor determinante en el desarrollo social y económico de una población y su aprovechamiento es primordial en el proceso productivo y el bienestar de las poblaciones. A su vez, diversas alternativas se han buscado para obtener agua en regiones áridas donde las precipitaciones anuales son limitadas. Existe dependencia casi total de los mantos freáticos y a causa de esto se encuentran sobreexplotados. Así mismo, en estas regiones áridas la energía solar presenta una disponibilidad inversa a la del agua y es por ello que este factor representa un gran potencial para su utilización.

Por otro lado, en los últimos años, diversos países han concentrado la atención en la reutilización del agua, específicamente en los efluentes de plantas tratadoras, así como obras de recarga inducida (Espino *et al.*, 2017).

De acuerdo con Espino *et al.* (2017) la necesidad de obtener agua de buena calidad de manera económica genera una oportunidad para la implementación de equipos que



aprovechen la energía solar, como es el caso de la destilación solar que representa una opción viable, ya que reproduce el ciclo natural del agua, en el que el agua a limpiar se calienta y produce vapor que se condensa dentro de un equipo para obtener un agua de mejor calidad. Dicho proceso no causa alteraciones al medio ambiente y es una fuente energética renovable. Consiste en un sistema que permite reproducir de manera acelerada el ciclo natural de evaporación y condensación de manera controlada para obtener agua pura.

El estado de Chihuahua se ubica en un área con clima seco y recibe una radiación solar de gran nivel, considerada como una de las mas altas del país y del mundo por estar en la franja de los desiertos mas grandes del mundo (CNA, 2010); este factor climatológico puede presentarse como una oportunidad y transformarlo para el abastecimiento y conservación del agua.

En la ciudad de Chihuahua se encuentran dos plantas de tratamiento (Planta Norte y Sur) para el tratamiento de los residuos líquidos municipales. El proceso que se utiliza es el de lodos activados, el cual remueve en un alto porcentaje los sólidos suspendidos totales y la materia orgánica presente en el agua de entrada, sin embargo, los efluentes presentan alto contenido salino y materia orgánica en concentraciones que limitan su uso al riego de áreas verdes en la ciudad (Espino *et al.*, 2017).

Por otro lado, el agua de estos efluentes puede ser utilizada en un proceso de destilación solar y posteriormente, una alternativa a la recarga inducida del agua subterránea, con un recurso que cumpla los estándares de calidad a nivel nacional e internacional (Espino *et al.*, 2017).

2.7 Uso de columnas de suelo para evaluar la calidad del agua resultante en pruebas de infiltración

Los suelos, que dependen de la evolución geológica de una región, son complejos y variables; éstos constituyen la primera capa de percolación y posterior almacenamiento de agua subterránea en los acuíferos, son un medio de crecimiento para las plantas y desarrollo de ecosistemas, por lo que en conjunto apoyan la mayor parte de la vida terrestre en su interacción con el ciclo del agua (Freeze y Cherry, 1979).



Edmunds (2004) señala que la zona saturada es importante como zona de amortiguación para atenuar la acidez, el contenido de metales y de algunas sustancias perjudiciales, bajo las propiedades de las arcillas: adsorción iónica, aniónica, catiónica y de gases. Además, dentro de la zona no saturada se encuentra la franja edáfica o la zona donde penetran las raíces, lo cual permite un filtro natural efectivo debido a su alto contenido en materia orgánica y actividad biológica; no obstante, los compuestos solubles como Cl^- , NO_3^- , F^- , As, entre otros, no son retenidos en la zona no saturada y se infiltran hacia mayores profundidades, aún cuando la zona tenga baja permeabilidad y un espesor considerable. También, el transporte de solutos a través de la zona no saturada puede verse afectada por diversos factores, tales como las propiedades físicas y químicas del suelo, la tasa de extracción de agua y soluto por las plantas, la tasa de aplicación de agua y soluto y el ascenso capilar de agua y solutos hacia la zona de raíces de las plantas (Guymon, 1994; Stephens, 1996; Domenico y Schwartz, 1998). La distribución espacial de un soluto reactivo y su movimiento a través del medio subterráneo están controlados por procesos hidrodinámicos de transporte de masa (advección, convección, difusión y dispersión) y procesos químicos asociados a reacciones de diversa naturaleza tales como la formación de complejos, reacciones ácido-base, de hidrólisis, disolución-precipitación, óxido-reducción, adsorción e intercambio iónico (Samper y Ayora, 1993).

En el campo de la investigación es muy frecuente la utilización de columnas de suelo, puesto que permite evaluar la calidad del agua, el transporte de solutos y las propiedades de los materiales con los que son llevados a cabo.

Para la realización de columnas de suelo, los estudios se centran en la zona no saturada, zona de aireación o zona vadosa ya que es el espacio físico comprendido entre la superficie topográfica y la correspondiente al primer nivel de agua subterránea (nivel freático), es el nexo cuasi universal entre los arcos terrestre superficial y terrestre subterráneo del ciclo hidrológico (Hernández, 2001). Así mismo, es importante el estudio de los sistemas de flujo de agua subterránea, su interacción con el ciclo hidrológico y la dinámica del agua, a través de la capa superficial de suelo (Freeze y Banner, 1970). Esta interacción está determinada, en parte, por las condiciones del clima, el agua en la superficie y las características del medio granular superficial. El análisis y predicción del comportamiento de dicha interacción está



controlado principalmente por propiedades del suelo como la textura, estratigrafía, propiedades hidráulicas (entre las que destacan porosidad, conductividad hidráulica y permeabilidad), contenidos de humedad y materia orgánica, incluidos diferentes aspectos de migración de solutos (Kung, 1990).

Capítulo 3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 Localización y vías de acceso

El acuífero Tabalaopa–Aldama se encuentra en la porción central del estado de Chihuahua y su superficie abarca parcialmente los municipios de Aldama, Aquiles Serdán y Chihuahua (Figura 3-1). El acuífero se identifica con la clave 0835 en el Sistema De Información Geográfica para el manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua. Comprende un área de 728 km² y queda delimitado por los paralelos 28° 32'30" y 29° 0' 0" de latitud norte y los meridianos 106° 10' 0" y 105° 52' 0" de longitud oeste. Colinda al norte con el acuífero Laguna El Diablo y Laguna de Hormigas, al oriente con Aldama-San Diego, al occidente con el acuífero Chihuahua-Sacramento, mientras que al sur colinda con el acuífero Villalba, todos en el estado de Chihuahua (CNA, 2018).

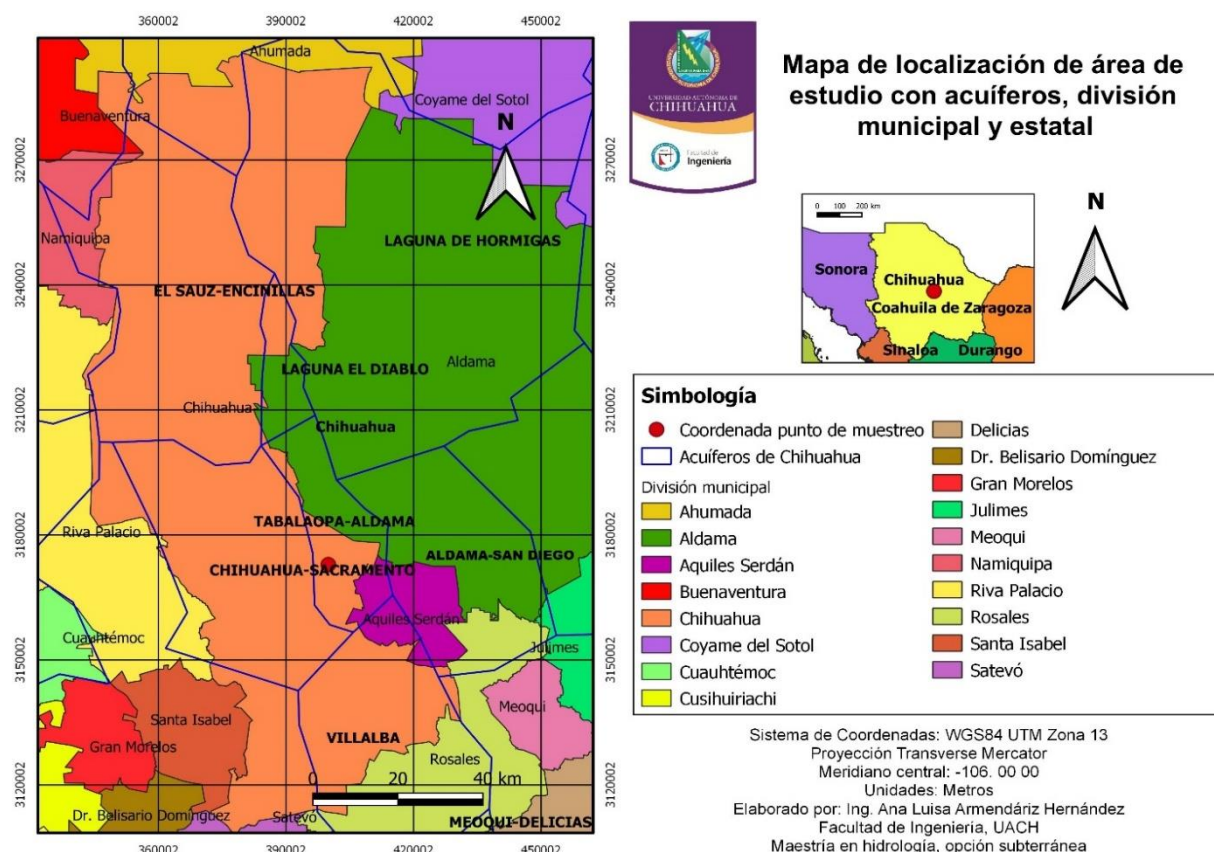


Figura 3-1 Localización del Acuífero Tabalaopa-Aldama.

El área de estudio se sitúa dentro del Acuífero Tabalaopa-Aldama en la porción Suroeste y su principal vía de comunicación es la Carretera Federal N. °16; en el tramo Chihuahua -

Aldama, aproximadamente en el kilómetro 5 hay una desviación y a 140 metros de la carretera se encuentra el punto del cual se tomó la muestra de suelo.

En las Figuras 3-2a y 3-2b se presenta la imagen satelital tomada de Google Earth donde se puede apreciar el punto de muestreo correspondiente a las coordenadas $28^{\circ}40'45.3''$ Latitud Norte y $106^{\circ}1'25.9''$ longitud oeste con una elevación de 1407 metros sobre el nivel del mar y las principales vías de acceso (Carreteras Federales), los poblados más cercanos como lo son Chihuahua, Juan Aldama y Santa Eulalia, así como las vías férreas.



Figura 3-2a Poblados más cercanos y principales vías de acceso al punto de muestreo.

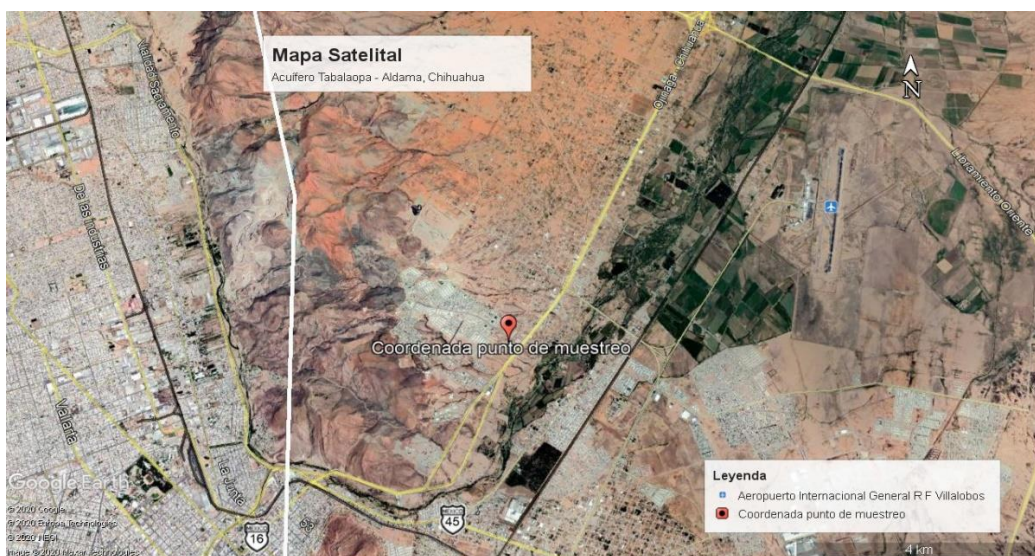


Figura 3-2b Acercamiento al punto de muestreo.

3.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tabalaopa–Aldama pertenece al organismo de Cuenca Río Bravo (Figura 3-3) y es jurisdicción de la Dirección Local en Chihuahua (CNA, 2018). De acuerdo a la CNA (2018) con respecto a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2008, los municipios de Aldama y Aquiles Serdán se clasifican como zona de disponibilidad 3 y Chihuahua como zona 5.

El principal usuario es el público–urbano. En su territorio no existen Distritos de Riego (CNA, 2018).

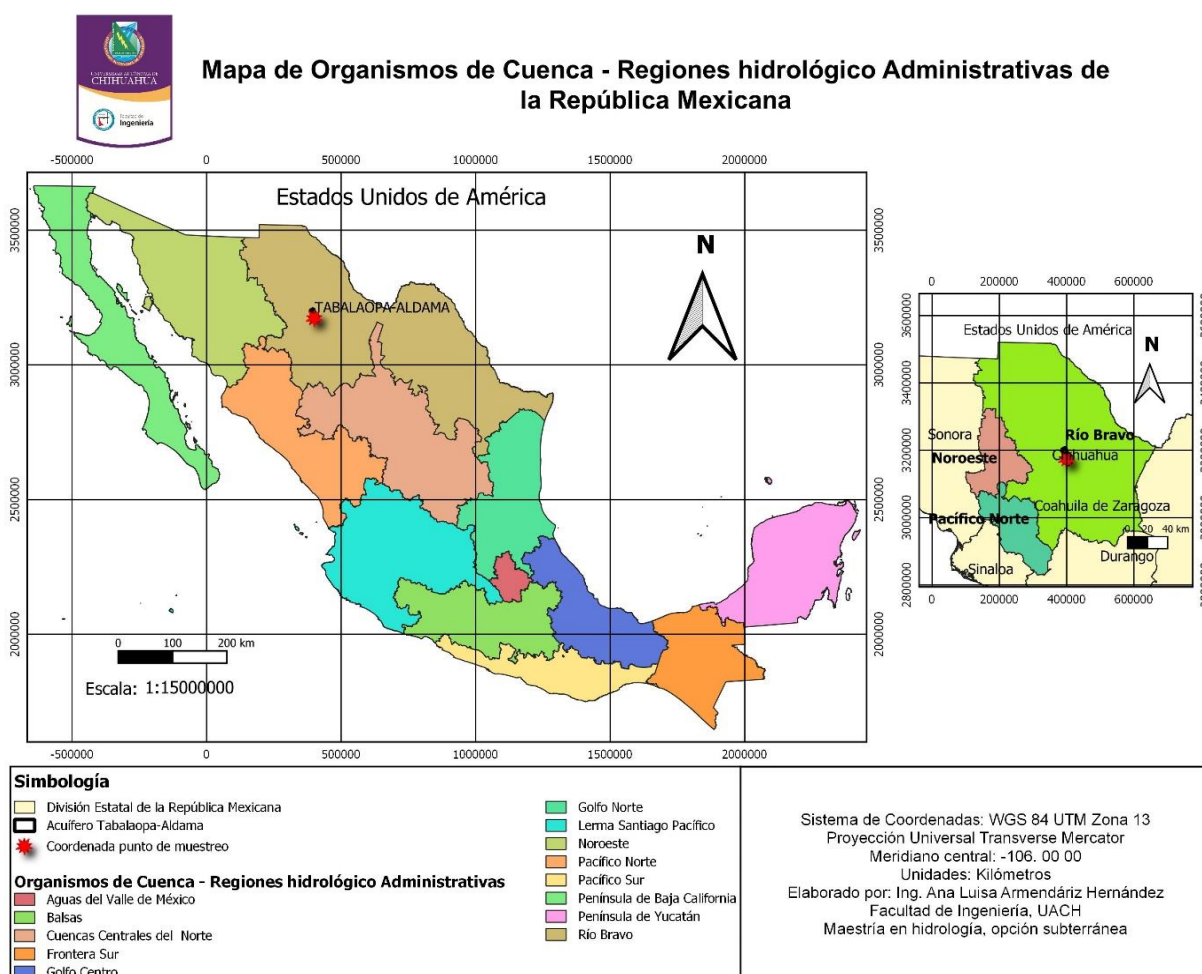


Figura 3-3 Organismo de cuenca al que pertenece el Acuífero Tabalaopa-Aldama.

3.3 Fisiografía

Los rasgos del relieve, pendiente, vegetación, precipitación y temperatura nos permiten diferenciar dos grandes regiones geográficas en el Estado de Chihuahua: Sierra Madre Occidental y Sierras y Llanuras del Norte. En la Figura 3-4, se puede observar el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) proporcionado por el INEGI, donde se presentan la topografía del Estado de Chihuahua en metros sobre el nivel del mar y la ubicación de las dos provincias fisiográficas.

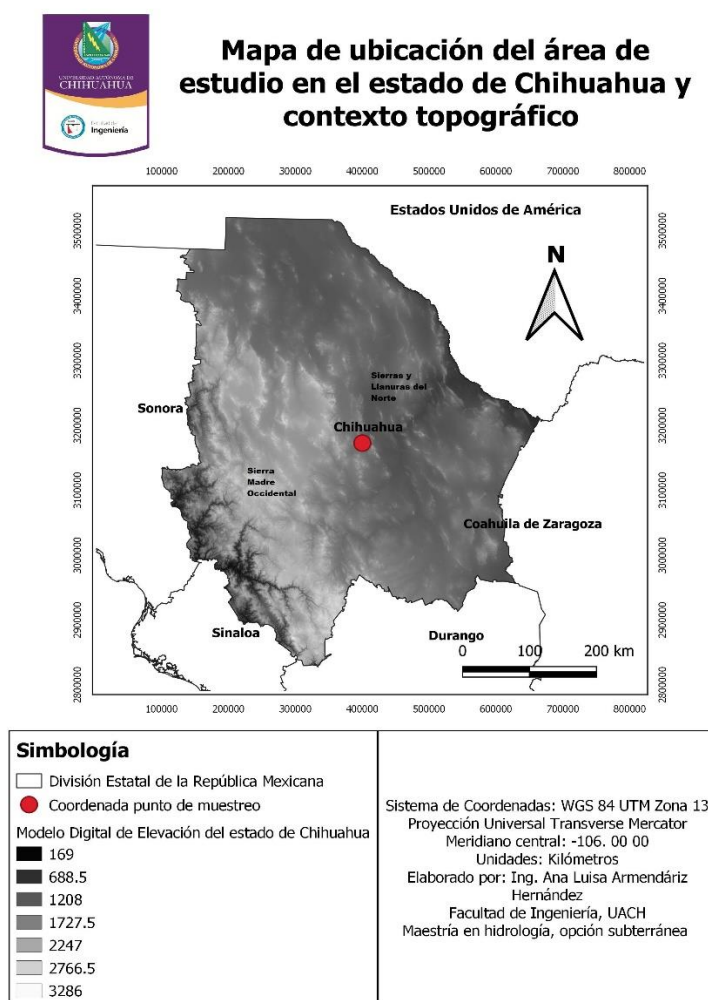


Figura 3-4 Contexto topográfico del Estado de Chihuahua y sus provincias fisiográficas.

El punto de muestreo de suelo en el Acuífero Tabalaopa-Aldama se localiza dentro de la provincia fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte. Esta provincia se caracteriza por llanuras

de suelo profundo que pertenecen al Cuaternario, mientras que el terreno de sierras está formado principalmente por rocas de origen sedimentario, como conglomerados y caliza-lutita. Su topografía es menos abrupta que en la provincia de la Sierra Madre Occidental; la altitud más baja es cercana a 1100 msnm y la más baja de 2400 msnm (CONABIO, 2017). A su vez, pertenece a la Subprovincia del Bolsón de Mapimí, que presenta un relieve poco abrupto, distinguido principalmente por llanuras aluviales que forman suelos profundos y lomeríos ramificados con cañadas de roca sedimentaria de caliza-lutita y conglomerado (CONABIO, 2017).

En la Figura 3-5 se muestran la topografía del Acuífero Tabalaopa-Aldama obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano y se señalan las dos sierras principales en el área: Sierra Nombre de Dios y Sierra El Cuervo. Estas sierras son usualmente elongadas hacia el noroeste. La Sierra Nombre de Dios se ubica en la porción oeste y está constituida por rocas ígneas, mientras que La Sierra El Cuervo se localiza en la porción este y sur y está constituida por rocas cretácicas plegadas (CNA, 2018).

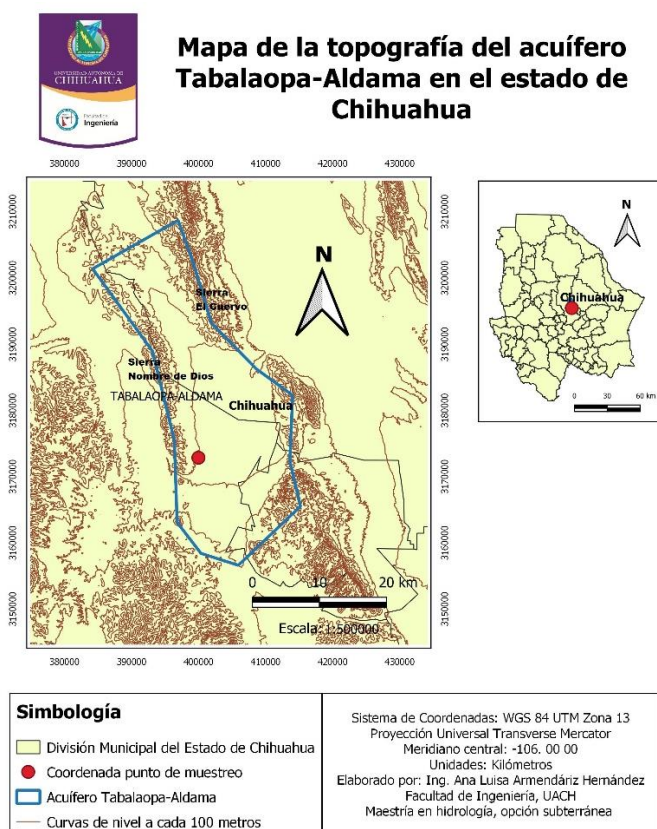


Figura 3-5 Topografía del Acuífero Tabalaopa-Aldama y Sierras presentes en el área.

Por otro lado, el INEGI proporciona el sistema de Topoformas y clasifica el área como llanuras. Para ilustrar mejor en la Figura 3-6 se muestran las Topoformas Fisiográficas del Acuífero Tabalaopa–Aldama y se observa que el punto de muestreo representa una llanura colinosa ligeramente diseccionada.

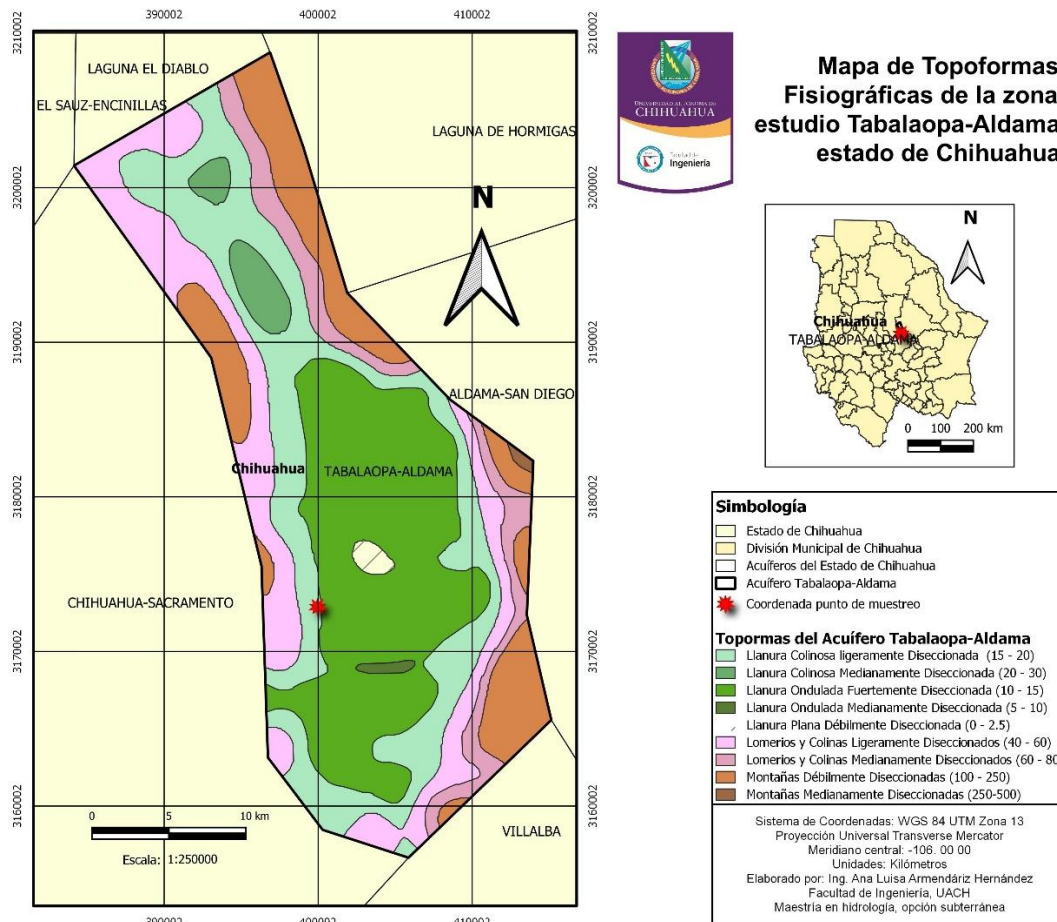


Figura 3-6 Topoformas fisiográficas del Acuífero Tabalaopa-Aldama.

3.4 Clima

En relación con el clima, la precipitación se divide en tres periodos: verano (de junio a septiembre), de secas (marzo a mayo) e invierno (octubre a febrero). De acuerdo con la temperatura media mensual de 30 años, el mes de junio es el más caliente y en enero más frío en la región fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte (CONABIO, 2014). De acuerdo a la clasificación del INEGI (2004), en el punto de muestreo del Acuífero Tabalaopa–Aldama predomina el clima de seco a semiseco y se pueden diferenciar dos tipos de climas: BS₀hw y

BS₁KW (w), el primero se caracteriza por ser seco árido y la temperatura media anual sobre 18°C, mientras que el segundo es semiseco semiárido y la temperatura media anual se encuentra entre los 18 y 12°C (Figura 3-7).

En el Informe publicado por la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2018) con respecto a las 8 estaciones climatológicas (La Mesa, Los Pozos Aldama, Chihuahua, Palacio de Gobierno, Posta Zootecnia, Universidad, Villa de Aldama y Escuela Superior de Zootecnia) con influencia en el acuífero se analizó la información y se estableció que la temperatura media anual en la zona es e 18.6°C. Por lo que se refiere a la precipitación medial anual se reportó un valor de 381.2 mm/año tomando en cuenta que el ciclo de lluvias comienza en el mes de julio y termina a finales del mes de septiembre y un valor promedio de evaporación potencial media anual de 2,125 mm/año.

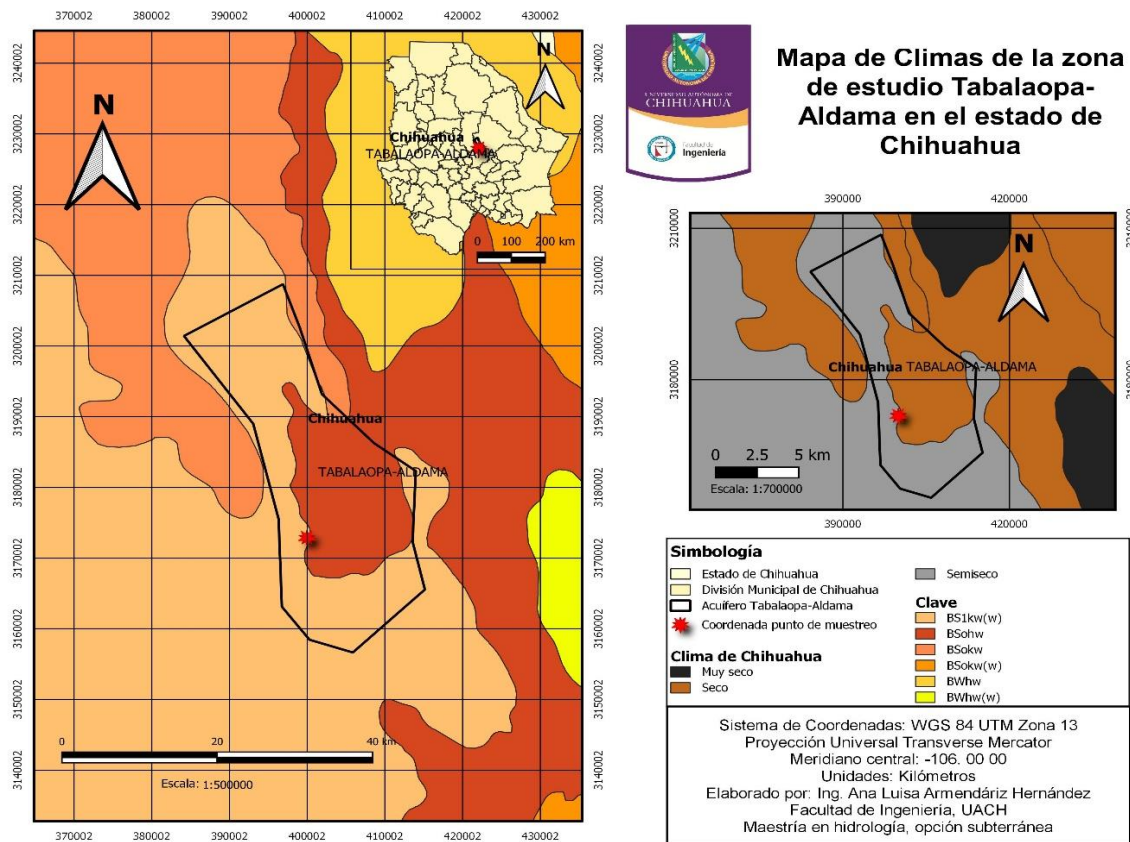


Figura 3-7 Mapa de Climas del Acuífero Tabalaopa-Aldama.

3.5 Hidrografía

Por lo que se refiere a su hidrografía, el acuífero Tabalaopa – Aldama se ubica dentro de la Región Hidrológica 24, Bravo-Conchos. Así mismo, la zona del acuífero se encuentra dentro de la Cuenca Río Conchos-Presa El Granero, dentro de la Subcuenca Río Chuvíscar (Figura 3-8). Las corrientes superficiales que se presentan en la zona del acuífero son efímeras y estacionales, en el periodo donde se presenta el nivel más bajo o caudal mínimo por causa de la sequía, no existe flujo en los arroyos, mientras que el río Chuvíscar existe un escurrimiento continuo a causa de la descarga de aguas residuales tratadas que son arrojadas por las plantas de tratamiento. Los principales arroyos afluentes del río Chuvíscar son el Mimbres, ubicado al norte, Los Nogales al Sur y Santa Eulalia en la porción sureste (CNA, 2018).

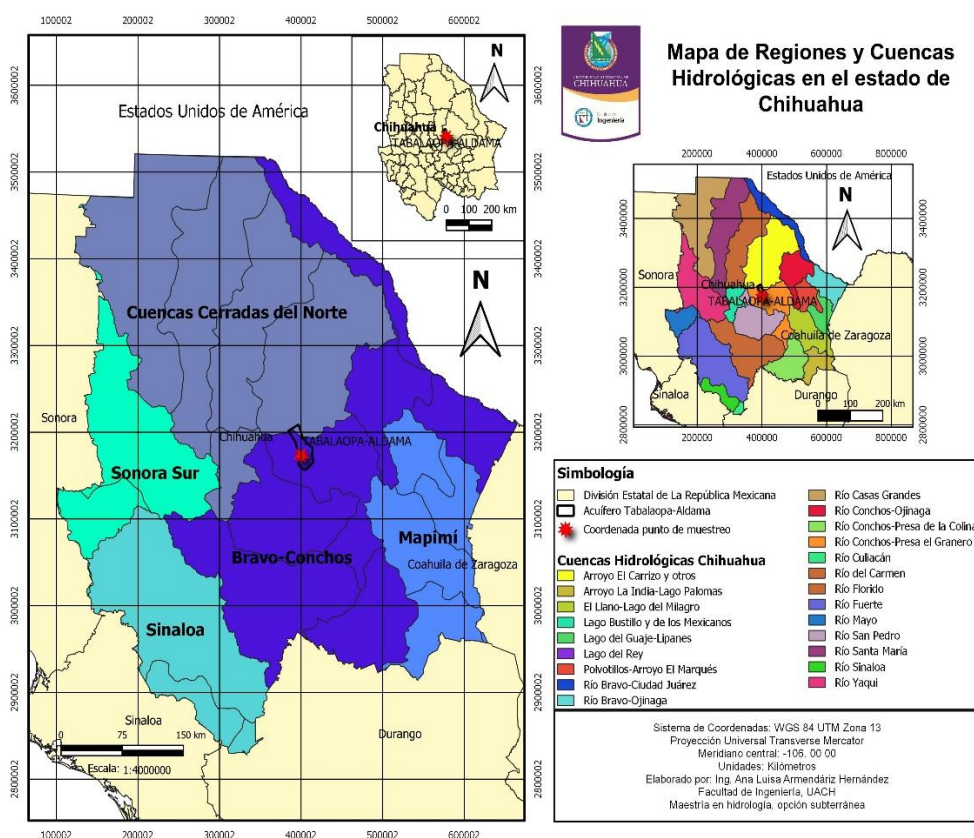


Figura 3-8 Regiones Hidrológicas en el Estado de Chihuahua.

El sitio de estudio tiene como corriente principal el Río Chuvíscar y queda entre los tributarios designados por el INEGI como El Cocedor y San Diego (Figura 3-9).

Por efecto del asentamiento urbano, la región tiene importantes obras de infraestructura hidráulica, como la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Sur y otra a menor escala en el fraccionamiento Camino Real, así como la red de agua tratada en una porción de la zona sur de la ciudad de Chihuahua (CNA, 2018).

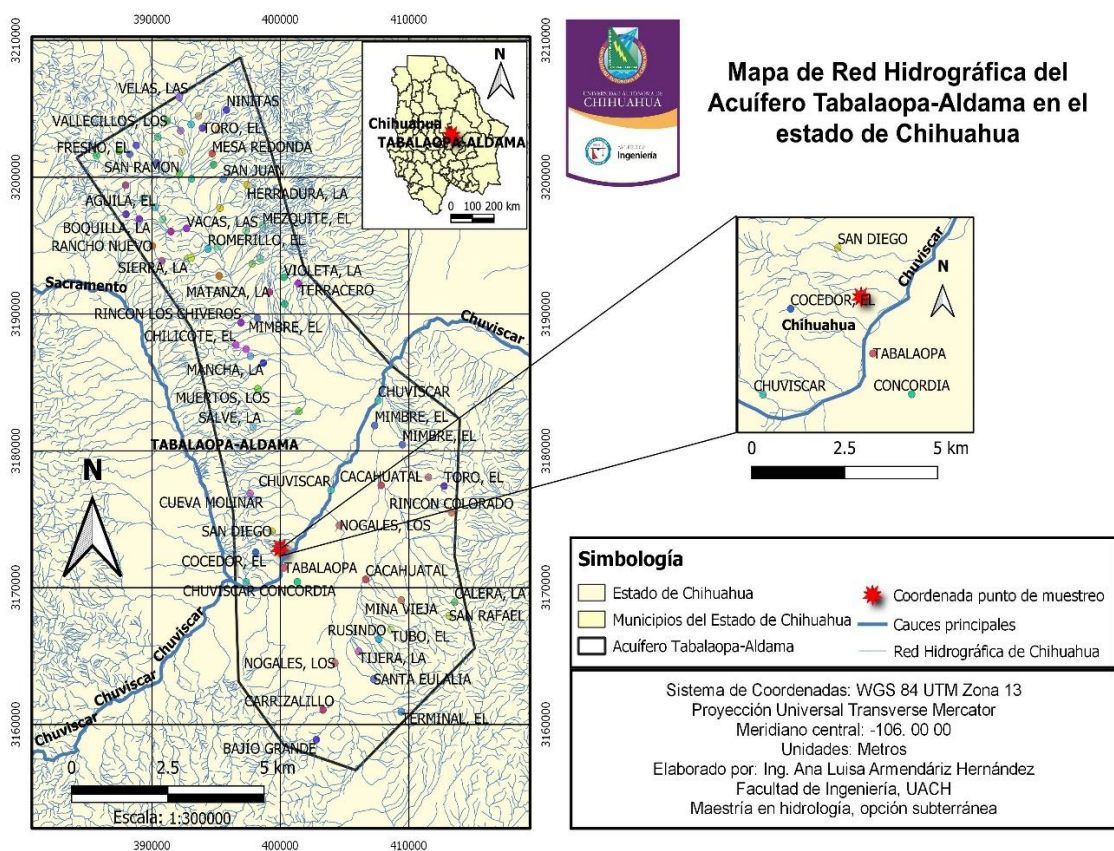


Figura 3-9 Red Hidrográfica del Acuífero Tabalaopa-Aldama.

3.6 Geomorfología

Por sus geoformas y relieve, el acuífero Tabalaopa – Aldama se agrupa en la región geomorfológica del Altiplano de Sierras y Cuencas, la cual se caracteriza por sierras angostas y cuencas muy alargadas y paralelas entre sí (CONABIO, 2014)

La zona se encuentra en una etapa de madurez con un avanzado grado de degradación de las estructuras (CNA, 2018).

En relación con el drenaje, el que predomina es el dendrítico-paralelo, mientras que el radial está en menor proporción. El primero se presenta en la porción centro y norte del

acuífero, las rocas son ígneas; mientras que en la Sierra El Cuervo también afecta a rocas sedimentarias. El drenaje radial se presenta por la presencia de los cerros El Coronel y Cerro Grande. En la porción sureste del acuífero el drenaje es dendrítico rectangular, afecta a rocas sedimentarias y drena de sureste a noroeste sobre el arroyo Santa Eulalia (CNA, 2018).

Por lo que se refiere a las zonas bajas o piamonte, se forman abanicos aluviales que se consideran como zonas potenciales de recarga debido a su granulometría gruesa. Las pendientes son suaves. Las zonas bajas del acuífero están constituidos de arenas de grano fino intercaladas con arcillas y limos. La Sierra Nombre de Dios presenta pequeños abanicos aluviales sobre los arroyos Los Muertos, El Romerillo y Las Palmitas y en la Sierra del Cuervo presenta las mismas características en los arroyos El Mezquite, la Herradura, La Violeta y el Mimbres (CNA, 2018).

En la Figura 3-10 se muestra la geomorfología que se encuentra en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.

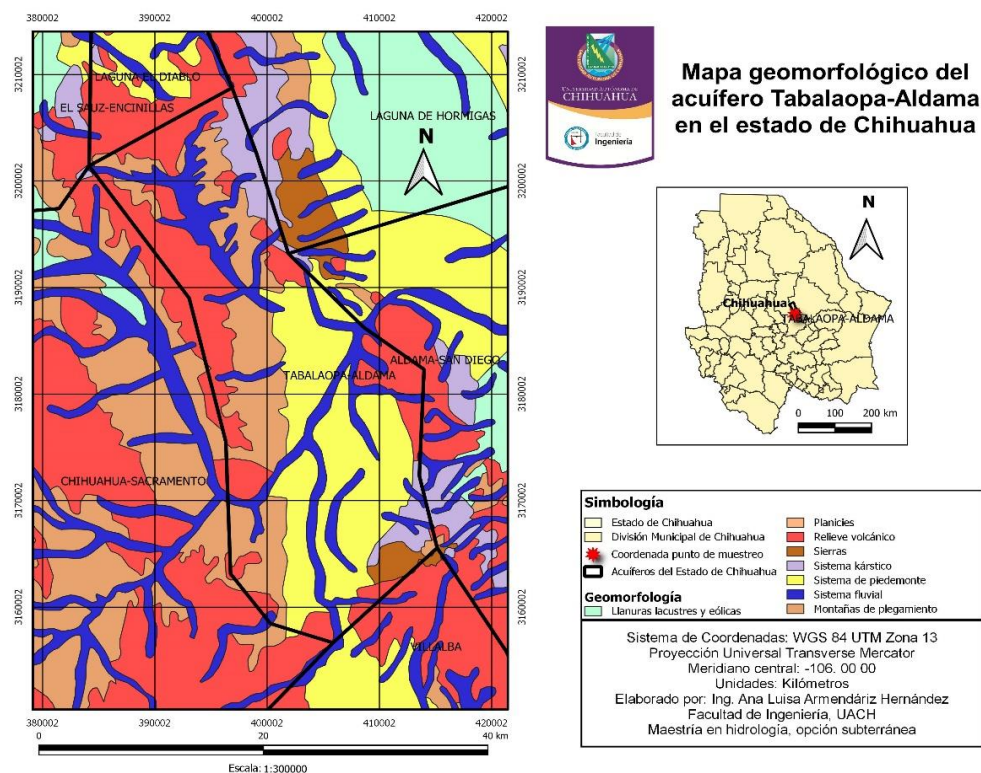


Figura 3-10 Geomorfología del Acuífero Tabalaopa-Aldama.



3.7 Geología

3.7.1 Tectónica de Sierras y Cuencas

La formación de las geoformas de Sierras y Cuencas sucedió hace 20 millones de años como resultado del cambio de dirección que aconteció durante la colisión entre la placa oceánica del Pacífico y la parte Sur de la placa continental de Norteamérica (Córdoba 1969; Bridges 1970; Tamayo 1982).

En otro tiempo, donde se encuentra actualmente la ciudad de Chihuahua, existió un lago. El río Chuvíscar intentó capturar la cuenca alta del Chuvíscar pasado por el lado sur, entre los cerros Santa Rosa y Grande. Después, un arroyo entre el Cerro Coronel y la Sierra Nombre de Dios logró la captura de la cuenca de Chihuahua junto con la cuenca del río Sacramento que drenaba al lago interior. Entonces, la Cuenca Cerrada de Chihuahua fue capturada por el río Chuvíscar durante el Plioceno (Wolleben 1965; Tarango y Reyes, 1994). A causa de esto, los sedimentos acumulados en la cuenca cerrada se vaciaron a través del río Chuvíscar hacia el Conchos. El proceso de desagüe y desazolve del lago provocaron la formación de las terrazas aluviales (CONABIO, 2014).

3.7.2 Geología del área de estudio

Por lo que se refiere a la secuencia estratigráfica contiene unidades desde el Precámbrico hasta el reciente (Cenozoico). El basamento está constituido por rocas gneísicas, anfibolíticas, graníticas y metamórficas del Precámbrico y sobre él subyacen la secuencia paleozoica y mesozoica (actual). Las rocas del basamento han sido sometidas a frases compresivas y distensivas (CNA, 2018).

Por otro lado, las unidades recientes están compuestas por depósitos conglomeráticos y aluviales, al noreste del acuífero existe la presencia de pliegues anticlinales y sinclinales en las rocas del Cretácico ocasionadas por el evento compresivo de la Orogenia Laramide. Este evento está asociado a la subducción sostenida de la placa oceánica Farallón, debajo del borde occidental de América del Norte y que dejó marcadas evidencias de su paso por el noroeste de México durante el Cretácico y el Paleógeno (Moreno y Rivera, 2011).



3.7.2.1 Estratigrafía

A continuación, se describen las unidades que afloran en el acuífero Tabalaopa – Aldama, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2018).

1. **Formación Rara (Ppi MLU-Mar Metalutita-Metarenisca).** Secuencias de metalutitas y metareniscas de color gris, laminadas, con una edad del Triásico. Presenta plegamiento y fallamiento inverso. Es notable la presencia de fracturas de tensión rellenas de cuarzo. Generalmente forma una serie de lomeríos de pendientes suaves. Su espesor no es mayor a los 1200 metros.

Por lo que se refiere al aspecto geohidrológico, esta unidad presenta escaso potencial hidrológico debido a su origen sedimentario, sin embargo, la deformación está acompañada de fracturamiento, lo cual puede ocasionar una permeabilidad media a baja.

2. **Grupo Cuchillo (Ki Cz-Lu). Formaciones Virgen y La Peña.** Debido al espesor de las unidades y a la escala del acuífero, se determinó agrupar las formaciones Virgen y La Peña en el grupo Cuchillo.

Formación Virgen. Secuencia de yesos, anhidritas y calizas del Cretácico inferior. Las calizas presentan color gris a negro en superficies frescas, se encuentran en estratos de 20 a 50 centímetros de espesor. Así mismo, algunos estratos de caliza contienen fósiles de bivalvos. El espesor de esta formación es variable y se estima en el estado de Chihuahua un promedio de 60 metros. Dentro del acuífero esta unidad es drenada por los arroyos El Mezquite, La Herradura y San Juan. El fracturamiento se comienza a manifestar en los respaldos de las fallas; en general se considera de permeabilidad baja.

Formación La Peña. Secuencia de calizas arcillosas que se localiza entre las formaciones Parritas y Aurora. En el área del acuífero su contacto superior es concordante y bien marcado con la formación Finlay (Grupo Aurora),



mientras que su contacto inferior es similar con la formación La Virgen. Es necesario destacar que desde el punto de vista geohidrológico se considera esta unidad impermeable debido al gran contenido de material fino de rocas sedimentarias como lutitas.

3. **Grupo Aurora (Ki Cz). Formación Finlay.** Se distribuye principalmente en el sector noreste, sin embargo, otros afloramientos se localizan al noroeste y en la parte baja de la Sierra de Santo Domingo. En esta formación predominan las calizas color crema en muestra fresca mientras que a la intemperie presenta colores amarillentos; intercaladas con estratos de dolomía. La caliza se encuentra fracturada. Los fósiles bivalvos que se observan son difusos. Por otro lado, debido a las inundaciones de obras mineras en Santa Eulalia y los caudales que se extraen en la mina San Antonio, se debe considerar esta formación, como una roca de permeabilidad secundaria con alto fracturamiento y fallamiento.
4. **Riolita (Tpa PR).** Sus principales afloramientos se encuentran al oeste y sureste del acuífero, además de las partes bajas de la Sierra Nombre de Dios. Es una brecha riolítica alterada, textura afanítica y presenta generalmente fracturamiento con alteración epitermal. Estratigráficamente cubre de manera discordante al Conglomerado Sacramento, mientras que es cubierta, por rocas andesíticas con textura porfídica.
5. **Andesita (Tpa A).** Esta formación se compone de derrames fisurales andesíticos del Paleoceno. Al norte del Cerro El Venado aflora una andesita de color gris claro en superficies frescas y café claro en superficie intemperizada, de textura porfídica (2 o 3 tamaños de grano distintos). Los fenocristales (cristales de mayor tamaño) que presentan son el feldespato, hornblenda y cuarzo, así como biotita. Por lo regular se encuentra fracturada y todos sus afloramientos se encuentran en la base de las sierras.



6. **Toba Riolítica (Te TR).** Se encuentra principalmente en la parte central y sur de la sierra Nombre de Dios. Se trata de riolitas de color café con tonos oscuros y amarillentos al intemperizar y gris claro en superficies frescas. En cuanto a la estratigrafía se encuentra cubriendo, de manera concordante, a la unidad volcánica formada por andesita, mientras que está cubierta por rocas de composición riolítica y hacia las partes bajas es cubierta por depósitos del Holoceno.
7. **Toba Riolítica (To TR).** En esta nomenclatura se agrupan varias unidades litológicas, tales como: tobas de caída libre, flujos piroclásticos, tobas cristalovítreas, tobas líticas e ignimbritas; esto es, una intercalación de tobas y sedimentos vulcanoclásticos del Paleógeno, separados hacia la cima por una discordancia angular formada por tobas de ceniza y basalto. Los afloramientos de estas unidades litológicas se localizan en las porciones oriente y poniente de las sierras San Ignacio y Santo Domingo, así como en la porción centro y norte de la Sierra Nombre de Dios. Por lo que se refiere a la litología, está constituida por una alternancia de horizontes vulcanoclásticos, conglomerado polimíctico, toba riolítica, limolita, arenisca y caliza, excepto en la Sierra Nombre de Dios.
8. **Conglomerado Polimíctico (Qho Cgp).** Se compone de una alternancia de gravas y arenas poco consolidadas. Se encuentra distribuido en el flanco oeste de la Sierra El Cuervo y Flanco este de la Sierra Nombre de Dios. Constituido por fragmentos líticos de caliza y en menor proporción de rocas volcánicas en las partes bajas de la sierra El Cuervo; mientras que el dominio de los clastos volcánicos es mayor en la sierra Nombre de Dios, presenta diferentes grados de redondez de subangulosos a subredondeados; la matriz es arenosa con escaso cementante calcáreo; su espesor varía de 1 a 20 m. El material sobreyace de manera discordante a la Formación Finlay y las unidades volcánicas de la época del Eoceno; infrayace de forma concordante



a limo y arena (Qho lm-ar). Se debe agregar que por su posición estratigráfica se le asigna una edad más reciente (Holoceno).

Desde el punto de vista geohidrológico es la unidad granular que más debe considerarse, debido a que llega a formar estructuras de abanicos aluviales donde desembocan los arroyos y, en esta zona puede ocurrir la recarga en temporada de lluvias, debido a la granulometría gruesa en partes proximales y en las regiones distales los sedimentos son más finos.

- 9. Limo-arena (Qho lm-ar).** Estos depósitos son producto de la erosión de las rocas preexistentes, transportados por corrientes fluviales para ser acumulados hacia las zonas de planicies y valles; se encuentran distribuidos hacia las partes centrales de la cuenca. Presentan estratificación, formados por horizontes de limo, arena y en menor proporción grava.

En los horizontes de arena se observan granos de cuarzo, vidrio volcánico, feldespato, hematita y abundantes líticos de riolita y andesita, la grava está constituida por fragmentos de roca volcánica.

Esta unidad cubre de manera concordante a la unidad Conglomerado Polimíctico y por sus características en cuanto a origen, composición y litología se le asigna la edad del Holoceno. Así mismo es característica de un depósito de facies continentales.

Las unidades estratigráficas descritas pueden observarse en la Figura 3-11.

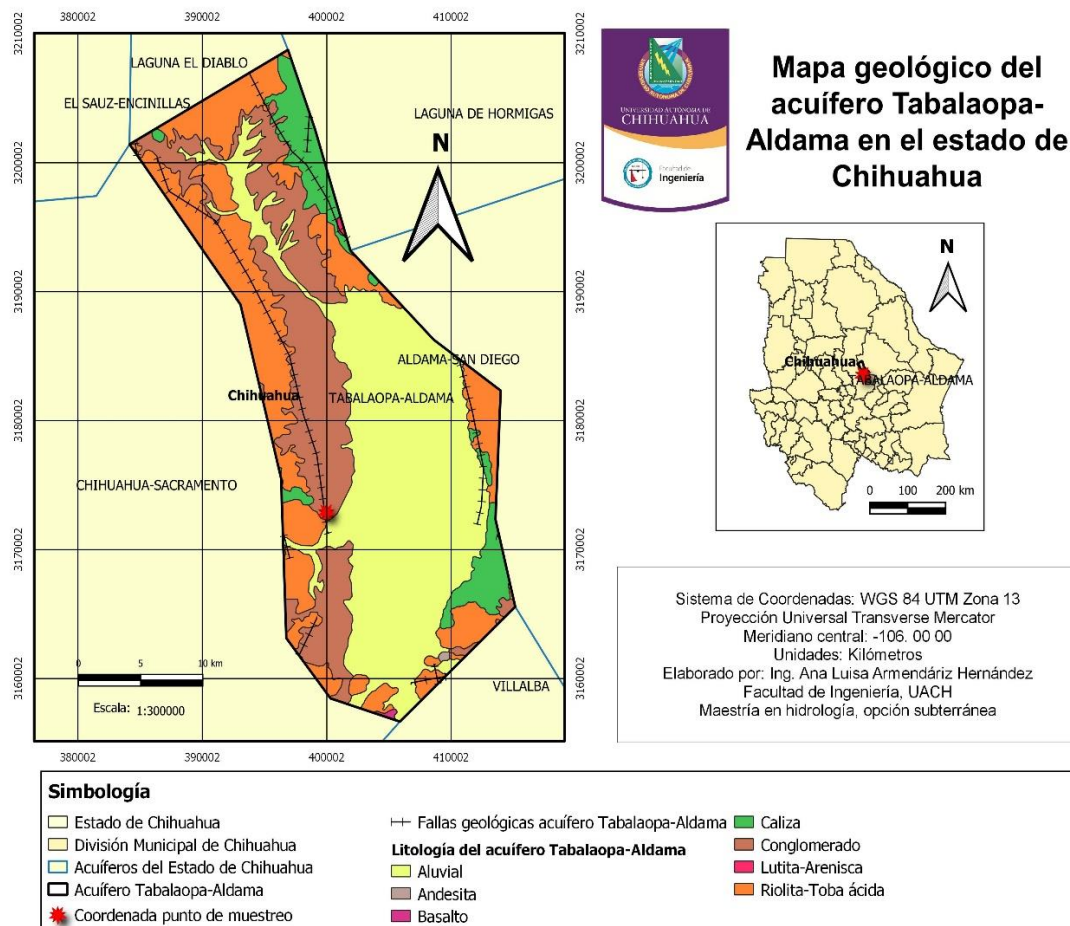


Figura 3-11 Geología del Acuífero Tabalaopa-Aldama.

3.7.2.2 Geología Estructural

Estructuralmente el área presenta abundantes fallas normales de orientación noroeste-sureste, las cuales afectan a toda la secuencia estratigráfica (CNA, 2018)

En relación con el control estructural, en esta zona se encuentra bien definido. El fracturamiento está presente en las rocas volcánicas, producto del evento distensivo de Cuencas y Sierras que afectó a las rocas preexistentes, originando un fracturamiento paralelo al esfuerzo. Por lo que se refiere a las rocas sedimentarias, además del fracturamiento producto de los eventos tectónicos, presentan zonas de disolución (CNA, 2018).

El sistema de fallas presente en el acuífero Tabalaopa-Aldama se ha podido identificar debido a que en el área se localizan obras mineras. En las minas Santo Domingo y San Antonio se presentan fallas de rumbo noreste 20° y describen dos estructuras

principales; la falla Oriente y Poniente, las cuales son fallas normales. Asociadas a estas estructuras existen fallas de rumbo noroeste 30° que aportan caudales a las fallas con orientación noreste 20° (CNA, 2018).

Por otra parte, la deformación dúctil-frágil está representada por pliegues anticlinales y sinclinales formados por el evento compresivo Laramide, con orientación noroeste sureste. La deformación frágil está representada por fallas normales y laterales que afectan a rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno y del Cretácico como se observa en la Figura 3-12. Existen tres sistemas de fallamiento principales: el primero es de orientación noroeste $30-55^\circ$, que desplaza al sistema noreste-suroeste, y el sistema noreste $12^\circ-80^\circ$ suroeste (CNA, 2018).

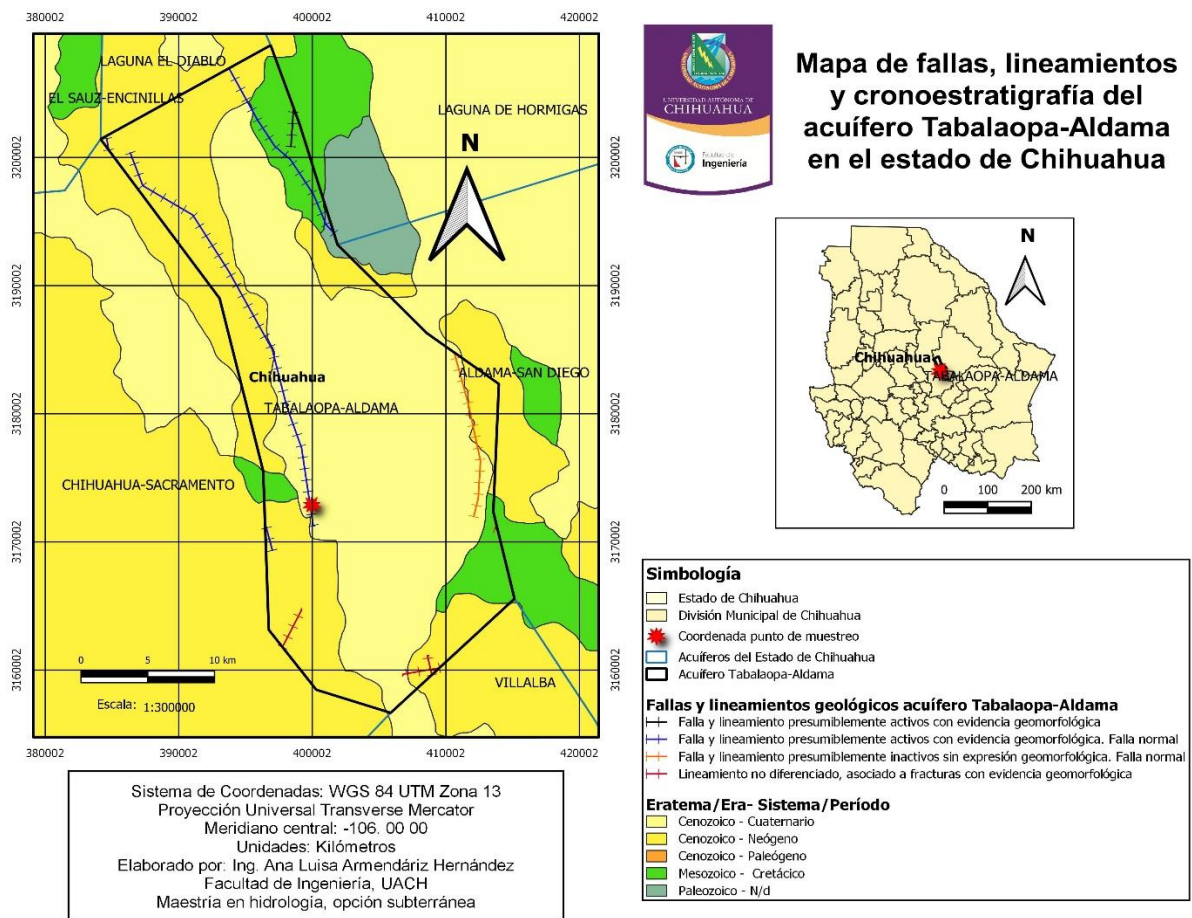


Figura 3-12 Fallas, lineamientos y cronoestratigrafía del Acuífero Tabalaopa-Aldama.



3.7.2.3 Geología del subsuelo

El Acuífero Tabalaopa-Aldama se encuentra alojado en un sistema granular no consolidado de origen aluvial, constituido por depósitos de arenas intercaladas con limos y arcillas, cuyos espesores varían entre 50 y 800 metros. Por debajo de este paquete aluvial existe una secuencia de riolitas, tobas y piroclastos, cuyas permeabilidades varían de baja a media, lo cual genera la posibilidad que el acuífero esté conformado por dos medios: granular y fracturado (CNA, 2018).

El basamento y fronteras al flujo subterráneo están constituidos por las mismas rocas vulcanoclásticas y por la secuencia metasedimentaria, cuyos afloramientos se presentan en la base de la Sierra El Cuervo, ubicada al noroeste de Ciudad Aldama.

3.8 Edafología

El suelo provee el sustento necesario para la existencia de plantas y animales, incluyendo la del ser humano. Así mismo, su origen es complejo, ya que los factores que intervinieron en la formación del suelo a partir del materia geológico original son múltiples; se destacan el clima, la actividad volcánica, la erosión hídrica y los movimientos sísmicos (Buol *et al.* 1983).

Según Tamayo (1982), los procesos que influyeron en la formación del suelo en el estado de Chihuahua datan de hace 135 Ma a mediados de la era Mesozoica, cuando casi todo el país estaba inmerso por el océano.

Por otro lado, la flora y la fauna que participaron en la formación del suelo fueron la presencia de coníferas y cicadáceas, así como peces, anfibios y reptiles; más reciente son la dominancia de pastos (desde hace 36 Ma) y la presencia de plantas con flores (Tamayo, 1982).

En los últimos dos millones de años, la región se vio afectada por una intensa actividad volcánica y, en particular, por la acumulación de rocas extrusivas que propiciaron la formación de las grandes montañas que dominan el paisaje de Chihuahua y que, al degradarse, permitieron que se rellenaran muchas de las depresiones (período Cuaternario) presentes en el altiplano y que constituyen los suelos de estas zonas (Tamayo, 1982).

Según información de CONABIO (2014), en las Sierras y Llanuras del Norte predominan los suelos jóvenes con pocos horizontes (Regosoles y Leptosoles).

3.8.1 Unidades de suelo del área de estudio

Dentro del área del acuífero Tabalaopa-Aldama se pueden distinguir dos unidades de suelo. A continuación se presentan sus características:

1. **Regosol.** Por definición es la capa de material suelto que cubre la roca. Este tipo de suelo se forma de materiales no consolidados de grano fino; son débilmente desarrollados como consecuencia de su edad joven o lenta formación (CONABIO, 2014). Generalmente son claros, pobres en materia orgánica y se parecen a la roca de origen. Son suelos someros en los que su fertilidad es variable (INEGI, 2004).
2. **Xerosol.** Este tipo de suelo se define como suelo seco. Se localizan en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. En cuanto a su vegetación natural es de matorral y pastizal. Tienen por lo general una capa superficial de color claro y por debajo un suelo rico en arcillas (INEGI, 2004). Los tipos de suelo se pueden observar en la Figura 3-13.

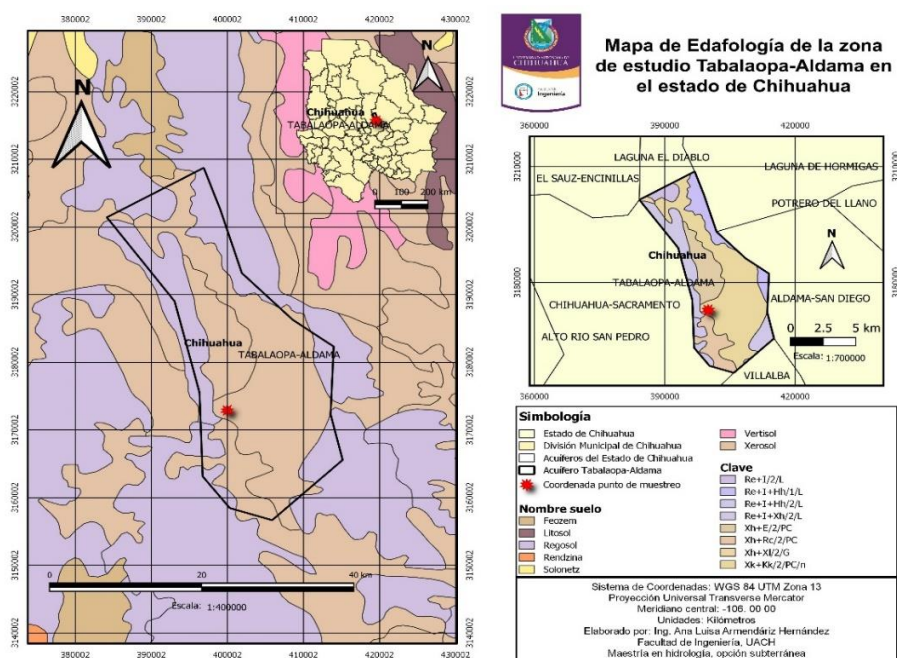


Figura 3-13 Edafología del Acuífero Tabalaopa-Aldama.



3.9 Uso de suelo y cubierta vegetal

La diversidad de climas, altitudes, geología y suelos en el estado propician el desarrollo de los ecosistemas tales como: bosques, pastizales y matorrales. El resto de la superficie estatal lo conforman áreas que han sido transformadas para la agricultura, la minería y áreas urbanizadas, o bien, los cuerpos de agua (INEGI, 2004).

3.9.1 Distribución de los ecosistemas y uso de suelo en el acuífero Tabalaopa-Aldama

Como se observa en la Figura 3-14 las coberturas por tipo de vegetación y uso de suelo que predominan en el acuífero Tabalaopa-Aldama son las zonas cubiertas por matorral, pastizal y uso de suelo agrícola. Enseguida se hace una descripción de los ecosistemas y el uso de suelo:

1. **Matorral.** Los matorrales son plantas con estructuras en forma de arbustos: tienen ramificaciones desde la proximidad del suelo y alturas inferiores a los 4 metros. En el área destacan los de tipo matorral desertico micrófilo y desertico rosetófilo. Los matorrales crecen en zonas áridas y semiáridas. Pueden establecerse en las zonas de matorral a pastizal (CONABIO, 2014).
2. **Pastizal.** Se incluyen en este concepto todas las áreas cuya vegetación está dominada por gramíneas. En el área de estudio se pueden distinguir dos tipos de pastizales; natural y uno propiciado por las actividades humanas. El primero se refiere al pastizal natural, asentado en gran medida por las condiciones climáticas, mientras que el segundo se refiere al pastizal inducido de origen antropogénico (CONABIO, 2014).

La diversidad que se halla en el pastizal natural se encuentra amenazada por el cambio de uso de suelo, la presión demográfica y el acelerado avance de la agricultura (CONABIO, 2014).

Por otro lado, los pastizales inducidos se constituyen de gramíneas que se establecen cuando es eliminada la cubierta vegetal original. Este pastizal

puede aparecer como consecuencia de desmontes en cualquier tipo de vegetación o por el abandono de áreas agrícolas, o bien en terrenos que se incendian con frecuencia (CONABIO, 2014).

3. **Suelos agrícolas.** La agricultura representa una mínima superficie en el acuífero Tabalaopa-Aldama, ya que se encuentra bajo la influencia de climas con un alto índice de aridez, donde las lluvias son escasas y mal distribuidas. La sequía es recurrente, de gran magnitud, sus efectos se van acumulando y su presencia en ocasiones dura varios años, lo que impacta en las actividades agrícolas y las urbano-industriales (CONABIO, 2014).

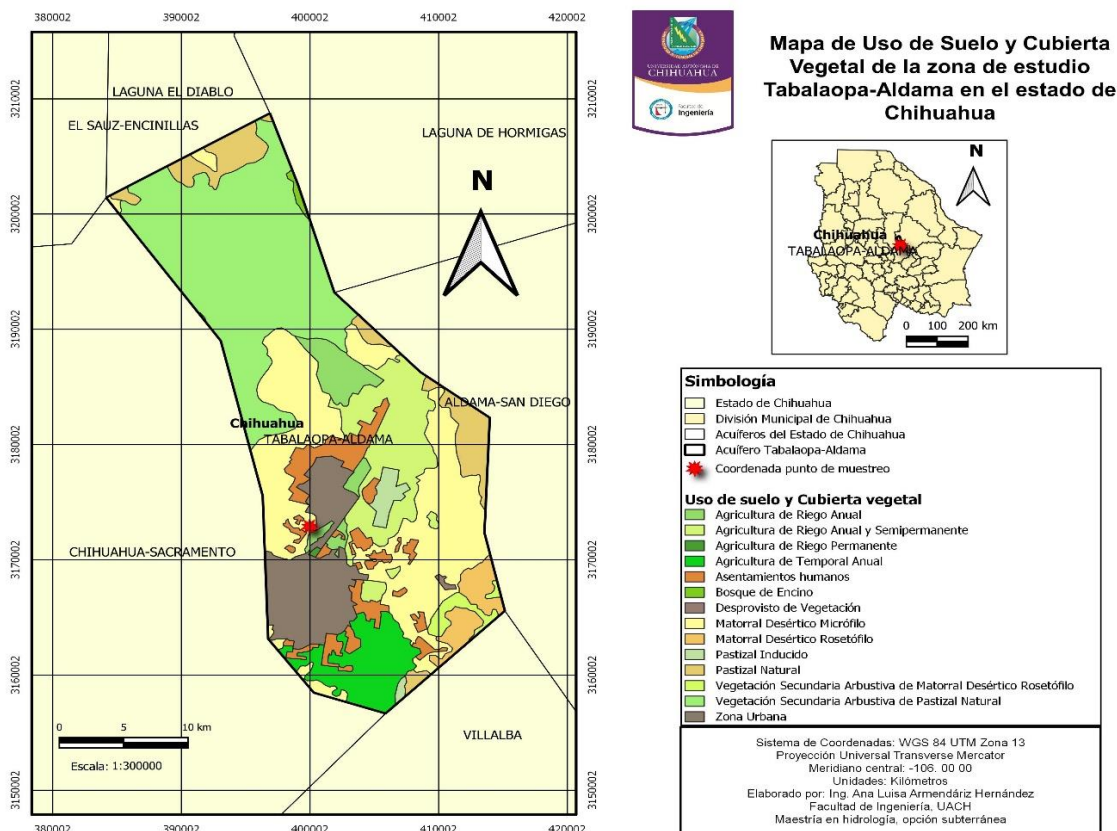


Figura 3-14 Uso de Suelo y Cubierta Vegetal del Acuífero Tabalaopa-Aldama.



3.10 Hidrogeología

3.10.1 Tipo de acuífero

El acuífero Tabalaopa-Aldama es de tipo libre, presenta una permeabilidad que varía de media a baja y se aloja en sedimentos aluviales depositados en el centro del valle, constituidos por arenas intercaladas con arcillas y limos. Por lo que se refiere a la recarga, la fuente principal por donde se infiltra el agua es en las zonas topográficamente altas; una menor fuente de recarga está representada por infiltración vertical del agua de lluvia que se precipita en el valle y por los retornos de riego agrícola (CNA, 2018).

3.10.2 Parámetros hidráulicos

Con base en el estudio de campo realizado en el año 2007 por La Comisión Nacional Del Agua se efectuaron 8 pruebas de bombeo de larga duración.

Como resultado de la interpretación se obtuvieron valores de transmisividad de 4.3 hasta más de 4800 m²/día y para la conductividad hidráulica se reportan valores que oscilan entre 0.0085 y 9.7632 m/día. Los valores más altos de estos parámetros hidráulicos se registran en los aprovechamientos ubicados en las inmediaciones del río Chuvíscar. Descartando valores mínimos y máximos, se obtuvo una transmisividad media de 2.44×10^{-6} m²/s y una conductividad hidráulica del orden de 4.34×10^{-8} m/s.

3.10.3 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en el Acuífero Tabalaopa-Aldama refleja variaciones considerables por dos causas principales. En primer lugar, el cono de abatimiento al noroeste de la comunidad La Mesa originado por los pozos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua (JMAS) y en segundo lugar, por la influencia del río Chuvíscar donde las profundidades son poco profundas hasta profundidades mayores a 100 metros que se registran al sureste del aeropuerto de la Ciudad de Chihuahua (CNA, 2018).

La profundidad máxima al nivel estático registrada fue de 141 metros en el pozo nuevo de uso público-urbano propiedad del ayuntamiento del municipio Aquiles Serdán,

3.10.4 Elevación del nivel estático

La Comisión Nacional del Agua (2018), en su reporte técnico indicó variaciones en elevación del nivel estático de 1250 a 1390 msnm en el centro y sur del acuífero para el año 2007. En los pozos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua se observó un cono de abatimiento con elevaciones de 1250 a 1320 msnm. Hacia la porción este del acuífero la elevación del nivel estático disminuye 1290 msnm, mientras que al oeste en la mancha urbana varía a 13990 msnm disminuyendo hasta los 1280 msnm hacia la parte sur. La dirección del flujo subterráneo indica una trayectoria (SW–NE), paralela al escurrimiento del río Chuvíscar, con alimentaciones laterales importantes provenientes de las sierras que delimitan todo el valle (Figura 3-16).

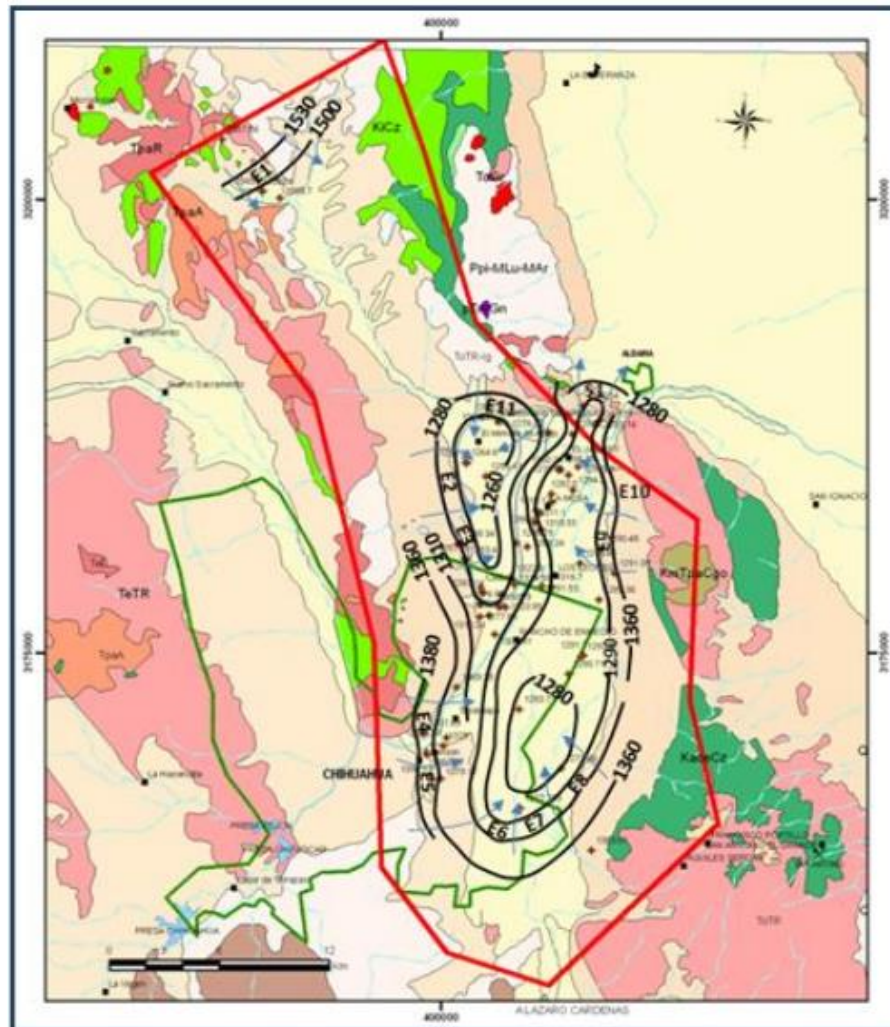


Figura 3-16 Elevación al nivel estático en metros sobre el nivel del mar del Acuífero Tabalaopa-Aldama (CNA, 2018).



Capítulo 4 MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este proyecto fue necesario la búsqueda y recopilación de información de estudios previos acerca del tema y de estudios generales de fuentes bibliográficas de las diversas instituciones de gobierno, artículos científicos publicados de la zona de estudio para comprender el marco físico y, trabajos de uso de columnas de suelo para análisis de la calidad del agua.

Posteriormente, se seleccionó el sitio para la toma de muestra dentro del acuífero y se colectó la muestra para su posterior caracterización en el laboratorio de Materiales, Suelos y Asfaltos de la Facultad de Ingeniería de la UACH. Para la realización de los experimentos de infiltración fue necesario el diseño y construcción de una estructura de madera casera para el sostenimiento de las 5 columnas de suelo requeridas para el proyecto y la adaptación de 5 llaves en la parte inferior de las columnas.

Siguiendo con la cronología, se prepararon y empaclaron 5 columnas de suelo. Se procedió a la etapa experimental la cual se dividió en las siguientes etapas:

Etapas 1: **Lavado de material de empaque en columnas de infiltración.** Enseguida se hizo una adaptación en la parte superior para agregar 5 equipos de venoclisis para regular la alimentación del agua en las columnas.

Las 2 etapas subsecuentes fueron: **Regulación del caudal (Estabilización) y Pruebas de recarga con diferentes tipos de agua (Estado Estacionario).** Finalmente se analizaron los resultados en el Laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la UACH y en el Servicio Geológico Mexicano (SGM). A continuación se describe detalladamente cada procedimiento:

4.1 Selección del sitio para la toma de muestra

Para la selección del material que se utilizó en las columnas de suelo, se delimitó una zona dentro del acuífero Tabalaopa-Aldama. El área se seleccionó con base a criterios hidrológicos de la zona. Así mismo, el punto del arroyo que se eligió representa una buena oportunidad para la recarga de acuíferos, debido a que el escurrimiento cuenta con las condiciones más favorables para la infiltración del agua.

4.1.1 Toma de muestra

La metodología a seguir para la recolección del material fue tomando en cuenta la geología del área de Tabalaopa–Aldama. Para tener un amplio panorama previamente se analizó la geología regional y después la geología local observando el cambio de litología entre un estrato y otro y eligiendo un punto del cual se tomó la coordenada geográfica utilizando un GPS Garmin eTrex 10. Una vez registradas las observaciones en una libreta de campo se procedió a buscar un área lo suficientemente aislada, para así evitar la contaminación antropogénica. Se determinaron los espesores de los estratos con una cinta métrica, seguido de la remoción del material que estuviera en contacto con la superficie para poder tomar una muestra inalterada, dicho procedimiento se muestra en las Figuras 4-1a y 4-1b. Posteriormente se recolectó el material del área en 5 botes con capacidad de 20 litros cada uno para la realización de las prácticas de caracterización del suelo y un pico y pala. El primero fue utilizado para la remoción del material mientras que el segundo para colocar el material en los botes. Por último, se registró con plumón indeleble el orden en que fueron tomadas las muestras, para su posterior transporte.



Figura 4-1a Obtención de la muestra en campo.



Figura 4-1b Medición del espesor del estrato.



4.2 Criterios seleccionados para la realización de la caracterización del material

Una vez obtenida la muestra, se cribó el material por la malla $\frac{3}{4}$ para remover el material grueso y se procedió a la caracterización del material para identificar las propiedades hidráulicas del suelo, tales como la distribución del tamaño de grano, capacidad de drenar el agua, compresión, capacidad de soporte de carga, etc. La muestra homogénea fue utilizada en los análisis de peso específico relativo de los sólidos (densidad de los sólidos), análisis granulométrico (granulometría), límites de consistencia; estos dos últimos análisis se clasificaron de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos S.U.C.S., permeabilidad de un suelo y el cálculo de la porosidad experimentalmente con la saturación en la Laboratorio de Materiales, Suelos y Asfaltos de la Facultad de Ingeniería de la UACH.

4.2.1 Peso específico relativo (densidad) de los sólidos

La densidad de los sólidos es la relación que existe entre el peso de los sólidos y el peso del volumen del agua desalojado por los mismos. Regularmente la variación de la densidad de los sólidos es de 2.60 a 2.80, aunque existen excepciones como es el caso de la turba que contiene materia orgánica y se registran valores menores a 1.5, en cambio en suelos con cierta cantidad de minerales de hierro la densidad ha llegado a 3 (Polanco-Rodriguez, 2009).

Para la realización de este análisis se tomó una muestra representativa del material a estudiar, la cual se le denominó (W_s). Se vertió agua al matraz hasta la mitad de la parte curva, se vaciaron los sólidos empleando un embudo y en la parte inferior del matraz se colocó una hoja, en caso de que el material vertido cayera por debajo y poder vaciarlo de nuevo al matraz. Se extrajo el aire atrapado en el suelo, empleando una bomba de vacío; el material con el agua se agitó sobre su eje longitudinal, se conectó a la bomba de vacío por 30 segundos como se muestra en la Figura 4-2. Se repitió el procedimiento 5 veces. Se completó la capacidad del matraz con agua hasta la marca del aforo, de tal manera que la parte inferior del menisco coincidió con la marca (500 ml), se pesó el matraz + agua + sólidos y se le denominó (W_{mws}). Posteriormente se tomó la temperatura de la suspensión y con la curva



de calibración del matraz se obtuvo el peso del matraz + agua hasta la marca de aforo y se le denominó (W_{mw}).

Los valores obtenidos se sustituyeron en la fórmula siguiente y se obtuvo el valor del peso específico o densidad de los sólidos (S_s):

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} - W_{mws}} \quad \text{Ecuación 4-1}$$



Figura 4-2 Extracción del aire atrapado en la muestra utilizando una bomba de vacío.

4.2.2 Análisis granulométrico (Granulometría)

Una vez obtenido el valor de densidad de sólidos, se procedió a tomar una muestra nueva de volumen considerable para realizar el análisis granulométrico. El objetivo del análisis granulométrico fue separar por tamaños las partículas de suelos gruesos y finos que componen la muestra de suelo en estudio, esto para la determinación de la distribución de las partículas de un suelo en cuanto a su tamaño y en función de lo anterior se clasificó el suelo de acuerdo a su graduación por ejemplo: grava bien graduada (GW), arena mal graduada (SP), etc. Ver Tabla 4-1 de S.U.C.S en el tema 4.2.4.1.

El procedimiento para este análisis consistió en el disgregado y cuarteado de la muestra representativa de suelo como se observa en la Figura 4-3; del cuarto se obtuvo un volumen y fue pesado y anotado el registro correspondiente. El peso total del material



obtenido en campo fue de 55.68 kilogramos, al realizar el método de cuarteo la muestra pesó 13.9207 kilogramos. Posteriormente, de ese material se tomó una muestra representativa de peso igual a 5.5497 kilogramos (Figura 4-4). Con este peso se procedió a pasar el material por las diferentes mallas, que van de mayor a menor abertura (3", 2", 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", No. 4, No. 10, No. 20, No. 40, No. 60, No. 100 y No. 200). El material retenido en cada malla se fue pesando y se anotó en la columna de peso retenido. Todo lo anterior se realizó hasta la malla No. 4 como se muestra en la Figura 4-5. Posteriormente, con el material que pasó dicha malla se obtuvo una muestra de suelo representativa, para ello se pasó el material varias veces por el partidador de muestras, hasta que se obtuvo una muestra de 500 gramos. Esta muestra representativa se vació en un vaso de aluminio y se vertió agua hasta llenarlo. Como el suelo en estudio tenía una cantidad apreciable de grumos, se dejó en saturación 24 horas.

Pasadas las 24 horas, se realizó el lavado del suelo, que consistió en agitar el suelo utilizando el alambrón con punta redondeada, haciendo figuras en forma de "ochos" durante 15 segundos, se vació el líquido a la malla No. 200 con el fin de eliminar los finos (que es el material que pasa dicha malla); este procedimiento se muestra en la Figura 4-6. Posteriormente se vertió más agua al vaso y se agitó de la forma antes descrita. Como en la malla se acumuló mucho material (arena), se reintegró al vaso, vaciando agua sobre el reverso de la malla, siempre se cuidó de no tener pérdida de material; esto se hizo cada 5 veces cuando se vació agua con finos a la malla No. 200, hasta que el agua salió casi limpia. El suelo se secó en la estufa (Figura 4-7), se dejó enfriar y después se pasó por las siguientes mallas (No. 10, No. 20, No.40, No.60, No. 100, No.200) y se procedió a pesar el material retenido en cada malla; el peso total del material retenido por cada malla fue de 1.3801 kilogramos . Para finalizar el análisis se realizaron los cálculos de % retenido parcial, % retenido acumulado, % que pasa y se dibujó la curva granulométrica. Así mismo se calcularon los % de grava, de arena y de finos, así como los Coeficientes de uniformidad (C_u) y de Curvatura (C_c).

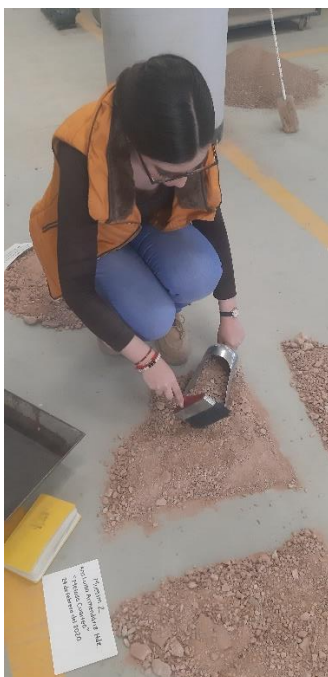


Figura 4-3 Obtención de la muestra por el método de cuarteo.



Figura 4-4 Muestra representativa para la realización del análisis.



Figura 4-5 Cribado del material.



Figura 4-6 Vaciado del líquido en la malla No. 200.



Figura 4-7 Material secándose en la estufa.



4.2.3 Límites de consistencia

Este análisis consistió en determinar los siguientes límites: Líquido (LL), Plástico (LP), así como la prueba de Contracción Lineal. El Límite líquido y el Límite plástico se emplean para clasificar un suelo, de acuerdo a su plasticidad.

La metodología de este análisis consistió en cribar el material por la malla No. 40, el cual se vació en una cápsula de porcelana y se humedeció durante 24 horas (Figura 4-8). Acto seguido se pesaron las charolas de aluminio para utilizarlos en los cálculos (4 para el Límite Líquido y 2 para el Límite Plástico).

Para la determinación del Límite Líquido (LL) el suelo se mezcló en la cápsula de porcelana, hasta que se observó una mezcla manejable y se colocó en la copa de Casagrande, distribuyendo el material del centro hacia los extremos, de tal manera que quedó en el centro una superficie a nivel. Después, se hizo una ranura en la parte media del suelo utilizando el ranurador, de tal manera que quedó perpendicular a la copa de Casagrande (Figura 4-9). Enseguida, se procedió a darle los golpes a la copa (con una frecuencia de 2 golpes por segundo), hasta que los taludes del material se unieron en una longitud aproximada de 13 milímetros, los golpes fueron contados y se registraron en la columna de Número de golpes. La condición cumplió entre 4 y 40 golpes y se logró con los intervalos de golpes de una vez entre 30 y 40 golpes, otra entre 20 y 30, otra entre 10 y 20 y otra entre 4 y 10, para que los puntos obtenidos al graficar el número de golpes contra contenido de agua, quedaran separados unos de otros y se pueda identificar con mayor claridad la Curva de Fluidez. En cada uno de estos ensayos se tomaron muestras en el centro de la copa, las cuales fueron pesadas y se registraron en la columna tara + suelo húmedo. A continuación, las muestras fueron introducidas al horno para determinar su contenido de humedad. Una vez que el suelo tuvo la humedad correspondiente al Límite Líquido (en el intervalo de 20 a 30 golpes en la copa), se llenó el molde rectangular en 3 capas, dándole golpes a cada capa contra la mesa, con la finalidad de extraerle el aire atrapado, después el molde se enrasó, se limpió exteriormente con una franela húmeda y finalmente se pesó, anotándolo como peso del molde + suelo húmedo; con lo descrito hasta aquí se realizó la prueba Contracción Lineal.

Para la determinación del Límite Plástico (LP), de la muestra menos húmeda se hizo una esfera de 1.5 centímetros de diámetro aproximadamente, la cual se giró y roló con la

palma de la mano sobre la placa de vidrio, hasta hacer un cilindro alargado (con un diámetro de 3.2 milímetros aproximadamente). Como el cilindro presentó agrietamientos múltiples, se dice que el suelo presenta el Límite Plástico y se obtuvieron muestras de suelo que se sometieron al secado para determinar el contenido de agua, el cual equivale al Límite Plástico (LP).



Figura 4-8 Suelo humedecido en la capsula de porcelana



Figura 4-9 Material en la Copa de Casagrande

4.2.3.1 Cálculos

Para obtener el Límite Líquido (LL) las muestras se secaron al horno, se dejaron enfriar y se pesaron, se registraron en la columna de: tara + suelo seco. Con estos datos se obtuvo el contenido de agua en los 4 ensayos y se graficaron Número de golpes contra Contenido de Agua, obteniéndose 4 puntos, por los cuales se trazó una línea recta por la parte intermedia de los puntos y se le llamó Curva de Fluidez; en 25 golpes se interceptó la curva de fluidez y de ahí con la horizontal, se leyó ese contenido de humedad, lo que correspondió al Límite Líquido.

Para el Límite Plástico (LP) se procedió a obtener el contenido de agua correspondiente; estos 2 contenidos de agua se promediaron porque no hubo una diferencia mayor a 2 puntos porcentuales. El promedio se reportó como el resultado del Límite Plástico.

Para obtener el Índice Plástico (Ip) al valor del Límite Líquido se le restó el valor del Límite Plástico, de la siguiente forma:

$$Ip = LL - LP \quad \text{Ecuación 4-2}$$



Para la Contracción Lineal, se determinó el porcentaje que se contrajo el suelo al secarse, con respecto a su dimensión más grande, involucrando la Longitud inicial (L_i) en centímetros, Longitud final (L_f) en centímetros y la contracción al secado ($L_i - L_f$) en centímetros. A continuación se presenta la fórmula utilizada para la obtención de este valor:

$$CL = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100 \quad \text{Ecuación 4-3}$$

4.2.4 Clasificación de suelos

Para la interpretación de los análisis de Granulometría y Límites de Consistencia es necesario clasificar el suelo de acuerdo a las diferentes clasificaciones que son: el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos S.U.C.S., el sistema de la American Association of State Highway & Transportation Officials (AASHTO), el método propuesto por la Federal Aviation Administration (FAA), el Sistema de US Department of Agriculture (USDA), y la taxonomía del Eurocódigo, entre otros. Las distintas clasificaciones de suelos intentan describir el comportamiento de los suelos que se vuelve complejo debido a la naturaleza granular y a la coexistencia de partículas sólidas con agua, contaminantes orgánicos e inorgánicos y gases (Narsilio y Santamarina, 2016).

Por otro lado, el sistema de la AASTHO (AASHTO M 145-82) se fundamenta en la distribución granulométrica, límite líquido y límite plástico. El Eurocódigo 7, que está orientado al diseño geotécnico, propone una clasificación basada en el contenido de humedad y densidad, densidad de partículas, análisis granulométrico, límites de Atterberg, ensayo de índice de densidad para materiales granulares, etc. (Narsilio y Santamarina, 2016).

A continuación se presenta en análisis detallado del S.U.C.S, seguido de la identificación de parámetros importantes que requieren caracterización apropiada.



4.2.4.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos S.U.C.S fue propuesto por Arthur Casagrande en 1932. Está basado en el análisis granulométrico y en los límites de Atterberg (límites líquido y plástico) de los suelos.

El contenido de finos corresponde a partículas de diámetro equivalente menor a 0.075 mm, pasante del tamiz No. 200. Si menos del 50% en peso del suelo pasa el tamiz No. 200, entonces el suelo es grueso y se subclasifica en arena o grava usando el tamiz No.4. De otro modo, el suelo es fino y se subclasifica en limo o arcilla, usando los límites de plasticidad.

Por lo que se refiere a un suelo de grano grueso, pero con la presencia de solo ~10% de finos, ve afectada grandemente su permeabilidad, haciendo que su valor cambie en órdenes de magnitud. Consecuentemente, el S.U.C.S tiene un rango del 5% al 12% de contenido de finos que modifica la clasificación de suelos.

Cuando no hay finos, el empaquetamiento de granos en suelos gruesos (gravas o arenas) depende del coeficiente de uniformidad $C_u = D_{30}^2 / (D_{10} \cdot D_{60})$ agrega información acerca de la convexidad de la curva granulométrica, indicando la presencia de diámetros extremos.

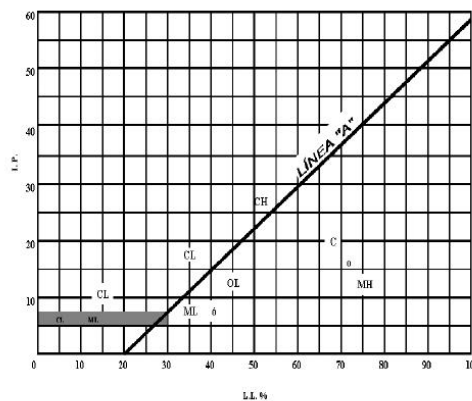
Por otro lado, los límites de Atterberg son escogidos para clasificar los suelos finos. Estos ensayos cuantifican la superficie específica; esto se puede observar en la Tabla 4-1.



Tabla 4-1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.)

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)
INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR				SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ⊕	son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GRAVAS LIMPIAS Poco o nada de partículas finas	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD C_u : mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA C_c : entre 1 y 3. $C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10}(D_{60}))$
				GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	
			GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* GM d u	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.
				GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla	
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 mm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 10	ARENA LIMPIA Poco o nada de partículas finas	SW	Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos	Cu = D_{60} / D_{10} mayor de 6 ; $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10}(D_{60}))$ entre 1 y 3. No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW
				SP	Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos	
			ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* SM d u	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.
				SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	
		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	Límite Líquido menor de 50	ML	Limos orgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduado, P – Mal Graduado, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad
				CL	Arcillas orgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
				OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	
		Límite Líquido Mayor de 50	Límite Líquido Mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.	
				CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.	
SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ⊕	Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	Límite Líquido Mayor de 50	OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.	CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)
				P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.	



** CLASIFICACIÓN DE FRONTERA- LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS. POR EJEMPLO GW-GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.
⊕ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD
* LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d Y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS UNICAMENTE, LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFJO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFJO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.



4.2.5 Permeabilidad de un suelo

El objetivo de este análisis fue determinar la velocidad con la que viaja el agua a través del suelo en estudio, expresando el valor en cm/seg, esta prueba fue de mucha utilidad ya que se observó la facilidad con la que pasó el agua a través del suelo, lo cual dependió de los huecos o vacíos que tuvo el suelo y cómo están intercomunicados. Por otra parte, un suelo grueso tiene más huecos que un suelo fino, por lo que tendrá mayor permeabilidad.

Para la prueba de permeabilidad en la muestra se utilizó el permeámetro de carga constante debido a que el suelo en estudio tiene un alto contenido de suelos gruesos (Gravas y Arenas).

Este análisis consistió en destapar el permeámetro, se colocó en el interior y en la parte de abajo una piedra filtro o piedra porosa. Posteriormente se fue llenando el permeámetro con el suelo, formando capas de material y se fueron compactando por medio de un pisón, de tal manera que al suelo se le dio el acomodo que tenía éste en el lugar. Se tapó el permeámetro, se le pusieron los tornillos, se aplicó agua al embudo del permeámetro y se dejó saturar el material hasta que no se observaron burbujas de aire. Enseguida se instaló el embudo a una altura aproximada de 2 veces la altura de la muestra y se siguió vaciando agua para que no le entrara agua aire al sistema (Figura 4-10). Se procedió a hacer las mediciones de volumen, al poner una probeta en la salida para un determinado tiempo, que fue entre 1 y 3 minutos. Se anotó el volumen de agua recogido, expresado en cm^3 y se repitió esta acción tres veces para obtener un promedio (Figura 4-11). Se midió la carga hidráulica (h), la longitud de la muestra (L) y la temperatura del agua en grados centígrados.

Las fórmulas utilizadas para la obtención de este análisis se muestran a continuación:

$$K_t = \frac{VL}{Aht} \quad \text{Ecuación 4-4}$$

Donde: K_t = Coeficiente de permeabilidad = cm/seg

A = Área de la muestra = cm^2

t = tiempo de prueba = seg

$$K_{20C} = K_t \left(\frac{\mu\tau}{\mu_{20C}} \right) \quad \text{Ecuación 4-5}$$

Donde: K_{20C} = Coeficiente de permeabilidad corregido por temperatura en cm/seg



Figura 4-10 Permeámetro de carga constante.



Figura 4-11 Medición del volumen con una probeta.

4.2.6 Porosidad

La porosidad en el suelo en las primeras capas de profundidad determina en gran medida la infiltración y el escurrimiento hacia niveles superficiales o profundos (Bruckler, 1998). Además, el flujo de agua y aire a través del suelo se realiza en el espacio poroso que está condicionado por el tamaño y distribución de los poros (Bonneau y Levy, 1979). Dicho lo anterior, la porosidad debe ser considerada un indicador de la calidad del suelo por el intercambio fisicoquímico y biológico que se produce en las fases (sólido, líquido y gaseoso) presentes en el suelo (Ruiz *et al.*, 2009).

El cálculo de la porosidad de la muestra se realizó experimentalmente con la saturación. En primer lugar se midió directamente el volumen de la muestra y se llenó de manera exacta en un vaso de precipitado cuyo volumen era conocido. Se tuvo cuidado de no trasladar la muestra a otro recipiente, ya que la porosidad se ve afectada debido a que el material puede perturbarse. Enseguida se midió el volumen de agua; la cantidad de agua no

fue importante, sólo se tomó en cuenta que fuera una cantidad mayor de agua de la que se fuera a necesitar para saturar la muestra y se tomó nota de la cantidad exacta de agua que fue utilizada (Figura 4-12). Se saturó la muestra con agua añadiendo una cantidad suficiente de agua para llenar todos los espacios vacíos de la muestra, pero no se añadió agua de más. Se saturó la muestra lo más exactamente posible, pero se debió considerar cierto margen de error (Figura 4-13). El nivel del agua quedó lo más cercanamente posible al de la muestra sólida y se registró el volumen de agua utilizado, para ello, se restó el volumen restante de agua al volumen de agua con el cual se empezó y se obtuvo el volumen que se retiró. El volumen de agua utilizado equivale aproximadamente al volumen de espacios vacíos de la muestra.

El cálculo de la porosidad se describe a continuación. Una vez que se obtuvo el volumen de la muestra (V_m) y el de espacios vacíos (V_e), comprendiendo por espacios vacíos los que están ocupados por gases y líquidos, se sumaron y se obtuvo el volumen total de la muestra (V_t), comprendiendo sólidos, líquidos y gases. Se empleó la ecuación siguiente para determinar la Porosidad (P_t):

$$P_t = \left(\frac{V_e}{V_t} \right) \times 100\% \quad \text{Ecuación 4-6}$$



Figura 4-12 Vaciado de agua para saturar el material



Figura 4-13 Material saturado con agua



A continuación, en la Tabla 4-2 se muestra una clasificación propuesta por Sanders (1998) que permitió la clasificación de la muestra en estudio observando los valores de porosidad.

Tabla 4-2 Valores estimado de porosidad. Fuente: Sanders (1998)

	total	eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fraturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

4.3 Diseño y construcción del sistema para columnas de suelo

Una vez que se ubicó el punto de muestreo, se recolectó el material y se realizaron los análisis para la caracterización del suelo, se procedió a realizar el diseño y construcción de una estructura capaz de soportar 6 cilindros de acrílico. El diseño utilizado permitió realizar pruebas de infiltración y de análisis de calidad de agua en columnas de suelo. Para el uso de los cilindros fue necesario realizar algunas adaptaciones tales como: agregar llaves de plástico en la parte inferior para la regulación del flujo del agua y una malla que sirviera como filtro para la retención del material.

4.3.1 Estructura para soporte de columnas

Por cuestiones de costo se optó por realizar una estructura de madera, parecida a los soportes de madera para tubos de ensayo que se utilizan en el laboratorio de química. Dicha estructura consta de una altura de 1.218 metros por 1.17 metros de ancho y una profundidad de 0.19 metros. En la parte inferior de la estructura cuenta con 2 patas, 1 de cada lado para darle estabilidad a la estructura con una altura de 0.05 metros. Por otro lado,



para soportar el peso de las columnas cuenta con una base del mismo ancho de la estructura a una altura 0.24 metros con respecto del piso y de grosor 0.068 metros. Las dimensiones se muestran en la Figura 4-14. Finalmente, la estructura fue pintada de color blanco para una mejor presentación (Figura 4-15).

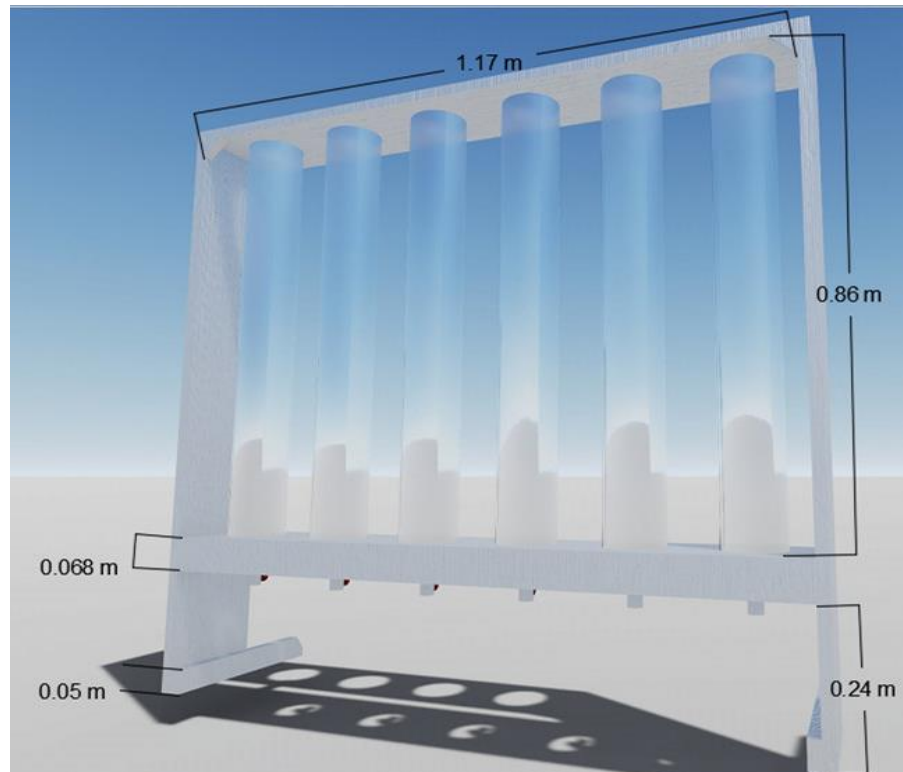


Figura 4-14 Diseño de la estructura para 6 columnas.



Figura 4-15 Estructura diseñada para el soporte de 6 columnas.

4.3.2 Cilindros de acrílico

El diámetro y la altura de los cilindros son 0.098 metros y 0.89 metros, respectivamente (Figura 4-16). Cuentan con un filtro en la parte inferior, a 0.09 metros de la base del cilindro y están elaborados del mismo material (acrílico), sin embargo, fue necesario adaptar un filtro adicional de tela de alambre cortado en forma circular y con abertura de 2 milímetros, el cual se adecuó en cada uno de los 5 cilindros. Por su parte, los cilindros cuentan con un hueco en la parte inferior de diámetro de $\frac{1}{4}$ de pulgada y en la parte superior con una tapa de diámetro mayor al del cilindro de 0.152 metros, con un orificio que sirve de alimentación a las columnas, con diámetro igual a 0.019 metros (Figura 4-17). En los extremos de las tapas se cuenta con 6 tornillos para poder manipularlas con facilidad.

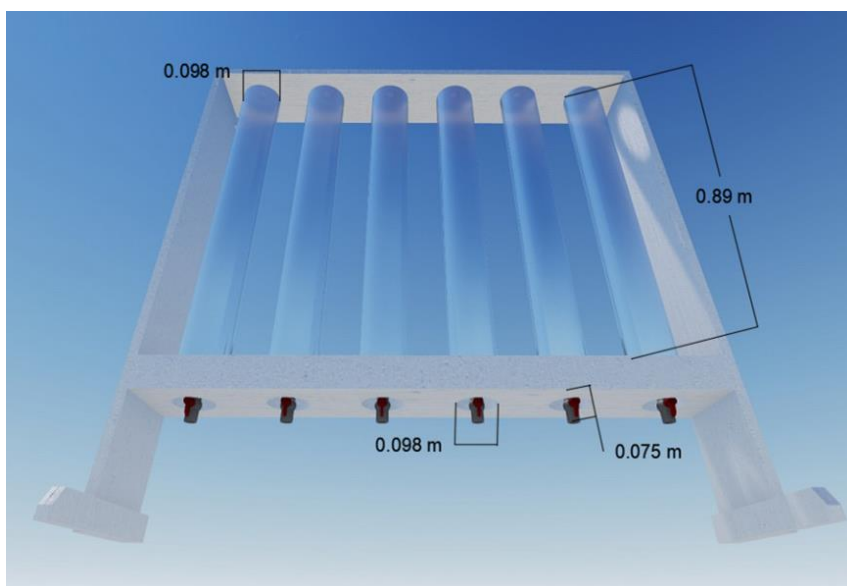


Figura 4-16 Altura y diámetro inferior de las 6 columnas de acrílico.



Figura 4-17 Diámetro superior de las 6 columnas de acrílico.

4.3.3 Adaptación de llaves

A fin de controlar y regular el flujo del agua para las pruebas y el cálculo de la velocidad de infiltración, fue necesario adaptar 5 llaves de plástico en la parte inferior donde está el hueco de $\frac{1}{4}$ de pulgada. Para el armado de las llaves se instaló una rosca para tubería de plástico de $\frac{1}{4}$ de pulgada en la entrada del cilindro y se le colocó una manguera de plástico para jardín de $\frac{1}{4}$ de pulgada (Figura 4-18), posteriormente se colocó una rosca de plástico de $\frac{1}{2}$ de pulgada, que, por medio de calor, se expandió y unió a la manguera anteriormente descrita. Seguidamente se colocó teflón y silicón para la prevención de fugas. Se instaló la llave al sistema de plástico de $\frac{1}{2}$ pulgada y de altura 8 centímetros. La distancia final entre la base del cilindro y la llave fue de 10 centímetros. Se hicieron las pruebas correspondientes para la detección temprana de fugas y se añadió silicón cuantas veces fue necesario. En la Figura 4-19 se muestra el diseño de las llaves.



Figura 4-18 Colocación de manguera de plástico para jardín de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

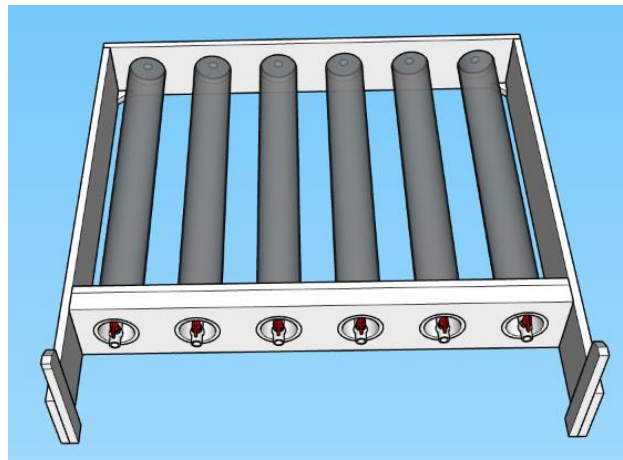


Figura 4-19 Diseño de las 6 llaves de plástico.



Para finalizar, las columnas fueron preparadas para los experimentos de calidad e infiltración mediante el lavado con agua destilada y fueron probadas para la detección oportuna de fugas. Este último punto fue crucial, puesto que en este trabajo de investigación la regulación del flujo resulta de suma importancia.

4.4 Empaquetamiento de columnas de suelo para experimentos

Concluida la etapa del diseño y construcción de las columnas se procedió a poner en marcha la etapa operacional. El primer paso consistió en el empaquetamiento de las columnas de suelo. La altura de las columnas fue de 58 centímetros y el volumen de material que se necesitaba para obtener esta altura se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$V = \pi r^2 \times h \quad \text{Ecuación 4-7}$$

El resultado de la aplicación de esta fórmula, se multiplicó por 5 columnas (las que fueron utilizadas para el experimento).

Una vez determinada la altura y el volumen necesario de material para cada una de las columnas, se procedió al empaquetamiento. Este consistió en mezclar el volumen total de material uniformemente con una pala, para posteriormente ir vaciando en cada una de las columnas el material con una pala pequeña (Figura 4-20) e ir dando golpes con un martillo de goma para que el material se fuese compactando y ayudar al acomodo de las partículas, sin obtener una compactación del 95% ya que lo que se quería simular era el suelo en estado natural (Figura 4-21). Los golpes fueron dados a cada 3 centímetros de altura para así tener un mejor resultado. Este mismo procedimiento se aplicó a las 5 columnas de suelo hasta obtener la altura deseada. Una vez que se empacaron las columnas se procedió con la etapa experimental.



Figura 4-20 Empacado del material



Figura 4-21 Martillo de goma empleado para compactación

4.5 Desarrollo experimental

A continuación se describen las etapas y equipo utilizado en la medición de los parámetros de control

La fase experimental comprendió las tres etapas siguientes:

1. Etapa I. Lavado de material de empaque en columnas de infiltración
2. Etapa II. Regulación del caudal (estabilización)
3. Etapa III. Pruebas de recarga con diferentes tipos de agua (Estado Estacionario)

Las etapas se dividieron de esta manera, ya que la idea principal del experimento era la reproducción a escala de la situación del área de infiltración lo más parecida a la realidad. Estas acciones engloban desde la colocación del agua destilada para el lavado inicial a la entrada (afluente) de las columnas hasta la salida (efluente) de éstas y culminaba con la medición de los parámetros de control, así como la recolección de muestras de agua para el posterior análisis de los parámetros fisicoquímicos en laboratorio.

Las 3 etapas del experimento consistieron en las descripciones diarias (por minutos y horas) del volumen de entrada y de salida de las 5 columnas, así como el cálculo de la velocidad de infiltración y el registro de los parámetros de control: Conductividad Eléctrica,



Sólidos Disueltos Totales, pH, Temperatura y Turbiedad. Así mismo, en la columna de observaciones se hizo la medición en el ascenso y descenso del agua tanto en la parte superior de la columna con respecto al nivel del suelo (nivel del terreno) y lo que se acumulaba en el filtro en la parte inferior de la columna.

Por otra parte, concluyendo la Etapa I se hizo una adaptación en la parte superior para agregar 5 equipos de venoclisis con válvula de control de flujo (Figura 4-22). Este sistema permitió tener un mejor control a la entrada de la columna para que se estuviera alimentando las 24 horas del día. La Etapa II consistió en la medición de los parámetros antes mencionados hasta obtener resultados de gasto y conductividad eléctrica con la mínima variación y finalmente concluyó con las pruebas de recarga con diferentes tipos de agua en las 5 columnas (Estado Estacionario) que fueron: agua desmineralizada (blanco), agua de lluvia, agua residual tratada de la Planta Sur, agua residual tratada de la Planta Norte y efluente de la Planta de Tratamiento Norte que pasó por un tratamiento terciario (destilación solar).

El equipo utilizado en la medición de los parámetros de control fue:

1. Medidor multiparamétrico HANNA modelo HI 9828 para los análisis de conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, pH y temperatura (Figura 4-23).
2. Turbidímetro portátil 2100P HACH (Figura 4-24).



Figura 4-22 Sistema de venoclisis implementado para la alimentación de las 5 columnas de suelo



Figura 4-23 Medidor multiparamétrico.



Figura 4-24 Turbidímetro Portátil.



4.6 Muestras colectadas y análisis en laboratorio

En la Etapa III del experimento se comenzó a recolectar las muestras de salida en las 5 columnas. Con los efluentes que presentaron mínimas variaciones en los resultados de calidad y gasto se formaron muestras compuestas. De éstas se tomó una muestra representativa, así como de la entrada de los 5 tipos diferentes de agua. Dichas muestras se llevaron al análisis de los laboratorios de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería a cargo de la Ing. Irma Peralta con personal y equipo de este laboratorio, así como al Servicio Geológico Mexicano utilizando el Método por Espectrómetro con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) para los análisis fisicoquímicos y de metales, respectivamente, presentados más adelante en los resultados de esta investigación.

Capítulo 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Selección del sitio para la toma de muestra y descripción de campo del material

El punto de muestreo del cual se tomó material para el experimento se ubica dentro del Acuífero Tabalaopa-Aldama en las coordenadas geográficas $28^{\circ}40'45.3''$ Latitud Norte y $106^{\circ}1'25.9''$ Longitud Oeste con una elevación de 1407 metros sobre el nivel del mar.

Por otro lado, dentro de la descripción de campo, el arroyo del punto de muestreo tiene 2.70 metros de espesor. En el estrato se observaban intercalaciones de material grueso (gravas) con algunos más finos (arenas). Además, las rocas presentes en el área eran del tipo sedimentario y volcánico, específicamente conglomerados y riolitas, respectivamente. Los conglomerados estaban redondeados y el cementante con una matriz más fina, mientras que las riolitas se pudieron identificar ya que presentaba un tono gris claro en muestra y al encontrarse al intemperismo se observaban tonos gris oscuro. En muestra de mano era clara la presencia de cristales de cuarzo y feldespato. Se debe agregar que no había la presencia de relleno por sedimentos posteriores a aquellos que ya existían (Figura 5-1).



Figura 5-1. Caracterización del material.

5.2 Caracterización del material de empaque de las columnas

5.2.1 Peso específico de los sólidos

El peso específico es una variable que permitió al material identificar otras propiedades fundamentales aplicables relacionadas con la cantidad de partículas de suelo en un volumen determinado. En este caso como la muestra es gruesa, tendió a mantener espacios de aire considerables que fue necesario extraerlos mediante una bomba de succión.



Por otro lado, el valor obtenido específico de las partículas sólidas según la Norma UNE 103302:1994 debe presentar valores entre 2.5 y 2.8 g/cm³ ya que es el rango promedio en el Ecuador, y lo calculado en el laboratorio fue de **2.55 g/cm³**, es decir, el valor es correcto.

$$S_s = \frac{100.3 \text{ gr}}{100.3 \text{ gr} + 673.4 \text{ gr} - 734.4 \text{ gr}} = 2.55 \text{ gr.}$$

5.2.2 Análisis granulométrico

La prueba de granulometría permitió clasificar la muestra de acuerdo al tamaño de partícula. Para diámetros mayores a 4.75 mm de abertura se considera grava, arenas de 0.075 a 4.75 milímetros de abertura, limos de 0.002 a 0.075 milímetros de abertura y la arcilla menor a 0.002 milímetros. Teniendo en cuenta estas medidas, se procedió a la clasificación de la muestra por medio de los porcentajes que pasaron cada una de las mallas y esa clasificación se muestra a continuación en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 Porcentaje de partículas que pasa por cada una de las mallas y clasificación del material

Muestra: Coordenadas: 28°40'45.3" N, 106°1'25.9 O. Elevación: 1407 metros						
Malla	Pulgadas	Abertura (mm)	Peso material retenido por cada malla en gramos	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	Que Pasa (%)
Malla 3"	3	76.2	0	0	0	100
Malla 2"	2	50.8	0	0	0	100
Malla 1"	1	25.4	0	0	0	100
Malla 3/4"	0.75	19.05	0	0	0	100
Malla 1/2"	0.5	12.7	198.2	14.36	14.36	85.64
Malla 3/8"	0.375	9.53	205.3	14.88	29.24	70.76
Malla No. 4	0.172	4.36	636.6	46.13	75.36	24.64
Malla No. 10	0.079	2.00	110.6	8.01	83.38	16.62
Malla No. 20	0.033	0.84	69.8	5.06	88.44	11.56
Malla No. 40	0.017	0.42	45.9	3.33	91.76	8.24
Malla No. 60	0.010	0.25	34.5	2.50	94.26	5.74
Malla No. 100	0.006	0.149	35	2.54	96.80	3.20
Malla No. 200	0.003	0.074	44.2	3.20	100	0
Finos						
Peso total en gramos:			1380.1			
Peso total en kilogramos:			1.3801			



Con lo anterior, queda demostrado que la muestra tiene el 75.36% de gravas puesto que este valor procede del porcentaje retenido acumulado de la malla No. 4, las arenas corresponden al 24.64% (la resta del 100% menos el porcentaje de material fino que en este caso es igual a 0% ya que no tiene).

Para ejemplificar mejor, en la Figura 5-2 se muestra la curva granulométrica, graficando el porcentaje del peso que pasa cada una de las mallas y el diámetro de las partículas en milímetros.

En escala logarítmica en el eje x, los 10 milímetros representan las gravas, 1 milímetro arenas y 0.01 corresponde a limos del cual la curva no tiene ese alcance ya que no hay finos en la muestra obtenida en campo.

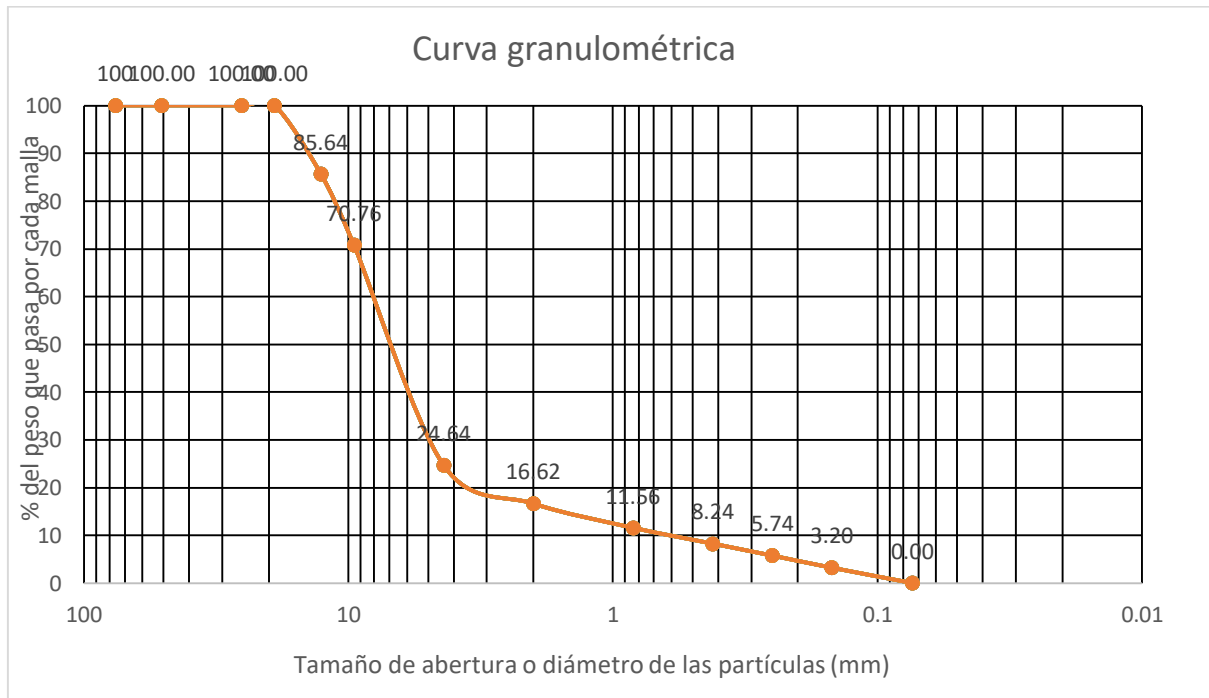


Figura 5-2 Curva granulométrica del material en estudio.

Una vez que se determinaron los porcentajes de material en la curva granulométrica, se obtuvieron los Coeficientes de la Curva Granulométrica (Coeficiente de Uniformidad C_u y Curvatura C_c) y los valores obtenidos se muestran en la Tabla 5-2. Estos datos sirvieron para determinar los porcentajes de grava y arena dependiendo del porcentaje de finos (fracción que pasa por la malla No. 200).



El material se clasificó como grueso porque tiene menos del 5% de finos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.). Como el suelo tiene un coeficiente mayor de 4 y el Coeficiente de Curvatura no se encuentra entre el valor 1 y 3, no satisfizo los requisitos para gravas bien graduadas (GW), así que el material se clasificó según sus límites de consistencia.

Tabla 5-2 Resultados del Coeficiente de Uniformidad C_u y Curvatura C_c

PESO INICIAL P_i =	1380.10
$C_u = D_{60}/D_{10}$ =	13.1
$C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$ =	4.74

5.2.3 Límites de consistencia

Para clasificar el suelo de acuerdo a su plasticidad se determinó el contenido de humedad y el número de golpes necesarios para obtener la curva de fluidez. Esto fue para obtener el límite líquido (contenido de agua), expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, que delimita la transición entre el estado líquido y plástico de un suelo (Tabla 5-3).

Tabla 5-3 Limite líquido, Limite plástico y contracción lineal.

CONTRACCIÓN LINEAL			L. L. =	26.03129	%
			L. P. =	22.33032	%
LONGITUD INICIAL:	10.0859	cm	I. P. =	3.700972	%
LONGITUD FINAL:	9.091	cm			
CONTRACCIÓN AL SECADO:	0.9949	cm			
CONTRACCIÓN LINEAL:	9.864265955	%			

TARA	PESO TARA	TARA + SUELO HÚMEDO	TARA + SUELO SECO	PESO AGUA	SUELO SECO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	NUMERO DE GOLPES
No.	gr	gr	gr	gr	gr	%	
Contenido Natural del Agua							
Limite Liquido							
31	12.12	21.31	19.45	1.86	7.33	25.38	30
35	14.74	26.38	23.95	2.43	9.21	26.38	26
3	14.94	25.42	23.21	2.21	8.27	26.72	16
26	11.39	24.52	21.67	2.85	10.28	27.72	9
Limite Plástico							
64	20.89	21.93	21.74	0.19	0.85	22.35	
40	14.62	16.21	15.92	0.29	1.3	22.31	

La curva de fluidez del suelo en estudio se muestra en la Figura 5-3 e indica que el número (en escala logarítmica) de golpes necesarios depende del contenido de agua del suelo (escala aritmética) y forma una línea recta donde se detectan más fácilmente los errores que en una línea curva y el índice de flujo se puede observar en la pendiente de la recta.

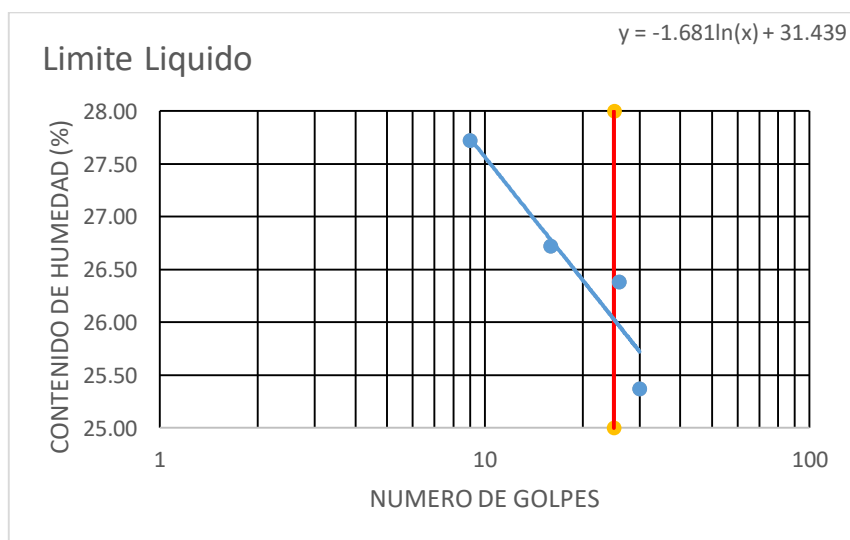


Figura 5-3 Curva de fluidez del suelo en estudio



Como el índice plástico es igual a 3.70, es un caso de frontera que requirió el uso de símbolo doble. Considerando todas las pruebas realizadas y la interpretación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), por medio de la identificación de los valores y la descripción de estos se clasificó el suelo como **GP – Suelo que corresponde a gravas mal graduadas, con mezcla de grava y arena con nada de finos.**

5.2.4 Permeabilidad del suelo

El resultado de la permeabilidad dependió de diversos factores tales como la viscosidad del fluido, la distribución del tamaño de grano, la relación de vacíos, el grado de saturación del suelo. El valor obtenido para la muestra en estudio de permeabilidad (k) fue de **1.895×10^{-2} cm/seg** y se muestra en la Tabla 5-4. Este valor indica que la muestra tiene mayor permeabilidad con respecto a otros suelos no saturados donde es menor y aumentó rápidamente con el grado de saturación, lo cual resulta lógico porque corresponde a **arena gruesa a grava limpia** según la clasificación de Braja M. Das (2013).

Por otra parte, se midió la temperatura con el fin de obtener la relación de viscosidad del agua que se da en una tabulación de Braja M. Das (2013) donde la temperatura a 24°C corresponde a 0.910 lo cual solo se multiplicó por el coeficiente de permeabilidad y se obtuvo un valor de 1.724×10^{-2} del coeficiente corregido.

Tabla 5-4 Resultados de análisis de Permeabilidad.

Datos de la prueba de carga constante	
Tipo de permeámetro:	Carga constante
Fecha de inicio:	25/03/2020
Área de sección transversal, A (cm ²):	31.67
Altura del espécimen, L (cm):	8.62
Volumen de agua recolectada, Q (cm ³):	376
Carga aplicada, h (cm):	30
Temperatura de prueba, T (°C):	24
Tiempo de prueba, t ₂ -t ₁ (seg.):	180
Coeficiente de permeabilidad, k (cm/s):	0.01895
Coeficiente de permeabilidad corregido, K _{20°C} (cm/s)	0.017243543



5.2.5 Porosidad

El resultado de porosidad se obtuvo del porcentaje de volumen de poros o espacios vacíos igual a **31.03%** lo que según la clasificación de Sanders (1998) indica que pertenece a gravas; este valor dependió de la disposición de las partículas sólidas y del contenido de materia orgánica. Esta condición fue favorable ya que la muestra en estudio tiene una mayor aireación del suelo y, en consecuencia, una mejor capacidad de infiltración del agua, así como una retención menor del agua en el suelo si se compara con suelos arcillosos. Aunado a esto, el tipo de material caracterizado permite la penetración de raíces, lo cual es favorable al hablar de una posible obra de recarga con este material.

5.3 Diseño y construcción de la estructura para soporte de las columnas

El resultado del diseño y construcción de columnas se puede observar en la Figura 5-4. La estructura construida así como las columnas de suelo permitieron tener una mejor interpretación de lo que sucede en condiciones naturales como la infiltración del agua, los sedimentos con los que se encontraba en contacto y la influencia que tienen éstos sobre la calidad del agua, así como el factor de verter cinco clases de agua en los sedimentos que afectan directamente a los resultados de las características fisicoquímicas en estudio.

Se reprodujo un modelo a escala que por medio de su diseño permitió la alimentación ininterrumpida del agua; la adaptación de las llaves y regulación de éstas permitió controlar el flujo del agua adaptado a la situación real de la supuesta zona de infiltración en relación a su conductividad hidráulica (Figura 5-5).

El sistema permitió coleccionar efluentes que por medio de gravedad descendieron y el suelo tuvo el mayor contacto con los sedimentos, debido al movimiento lento a través de las columnas. Además, su diseño permitió que fueran medidos continuamente por medio de vasos previamente graduados con respecto al volumen. El uso de equipo de campo facilitó las mediciones de control durante la etapa de experimentación hasta que la muestra fuera colectada y almacenada en botellas, para su refrigeración y posterior análisis de los demás parámetros fisicoquímicos en laboratorio.

Por otro lado, el sistema de venoclisis conectado en la parte superior de la estructura permitió el flujo continuo del agua a través del medio las 24 horas con un sistema que

permitió tener un mejor afluyente debido a las condiciones de esterilidad del material empleado.



Figura 5-4 Estructura para experimentos en columnas



Figura 5-5 Llaves implementadas al sistema

5.4 Resultados experimentales

5.4.1 Etapa I. Lavado de material de empaque en columnas de infiltración

El objetivo de esta etapa experimental fue realizar el lavado del suelo utilizado como material de empaque en las columnas de infiltración, antes de aplicar los diferentes tipos de agua a utilizar en las pruebas de recarga. El lavado en todas las columnas se llevó a cabo empleando agua tridestilada y midiendo a la salida las variaciones en el contenido de sales disueltas en términos de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, hasta obtener estabilidad en estos parámetros.

5.4.1.1 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales de la Columna 1

En la Figura 5-6 se puede apreciar los valores de conductividad eléctrica (periodo del 9-jun-20 al 12-jun-20) que arrojó el material en el primer lavado de la columna que corresponde a 889 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Gradualmente fueron disminuyendo conforme el agua libre de minerales fue fluyendo en el medio hasta obtener un valor de conductividad de 487 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este valor indica la remoción de las sales disueltas que tenía el material en estudio, de igual



manera con los Sólidos Disueltos Totales, ya que el valor está íntimamente relacionado con la Conductividad Eléctrica.

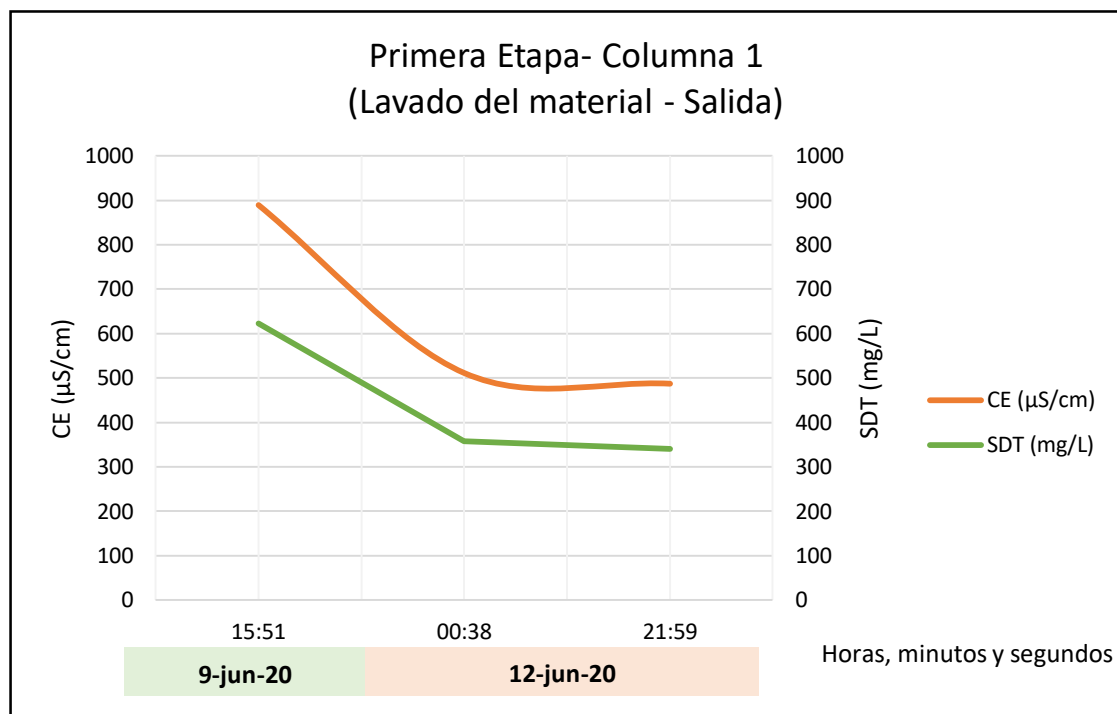


Figura 5-6 Resultados de CE Y SDT, Columna 1, Etapa I.

5.4.1.2 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 1

Otro de los parámetros analizados en la muestra de salida de la columna fue el pH. Como se muestra en la Figura 5-7 donde se puede ver que el intervalo de pH permanecía casi constante con valores de 8.16, 8.53 y 8.25 del periodo del 9-jun-20 al 12-jun-20.

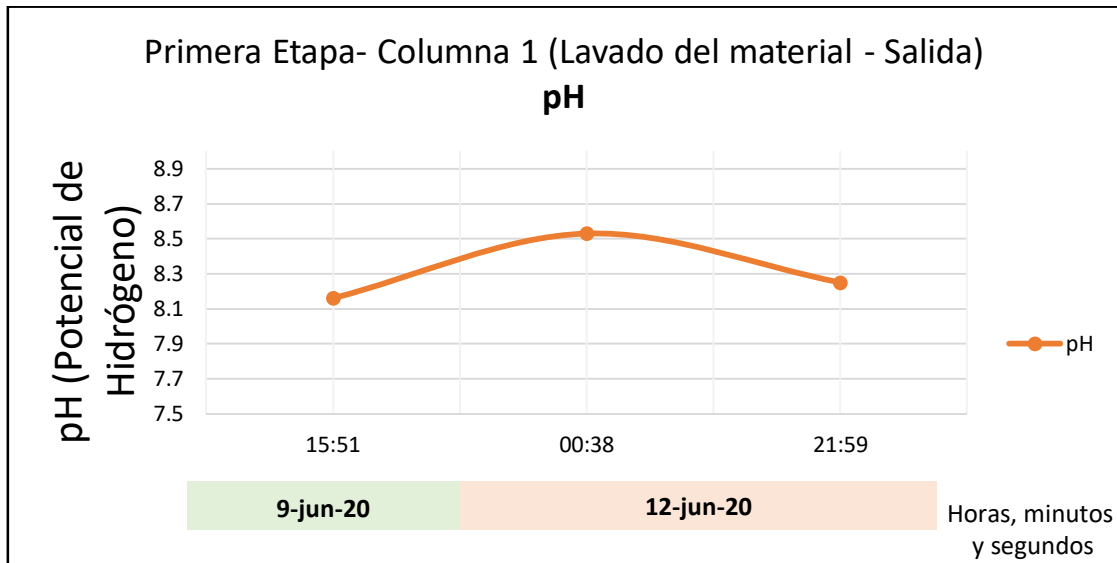


Figura 5-7 Resultados de pH, Columna 1, Etapa I.

5.4.1.3 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 2

Para la misma etapa del experimento, del periodo del 10-jun-20 al 12-jun-20 se observó una conductividad eléctrica de 963 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una disminución gradual con un ligero aumento en la conductividad en la última recolección de la muestra con un valor de 519 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 5-8).

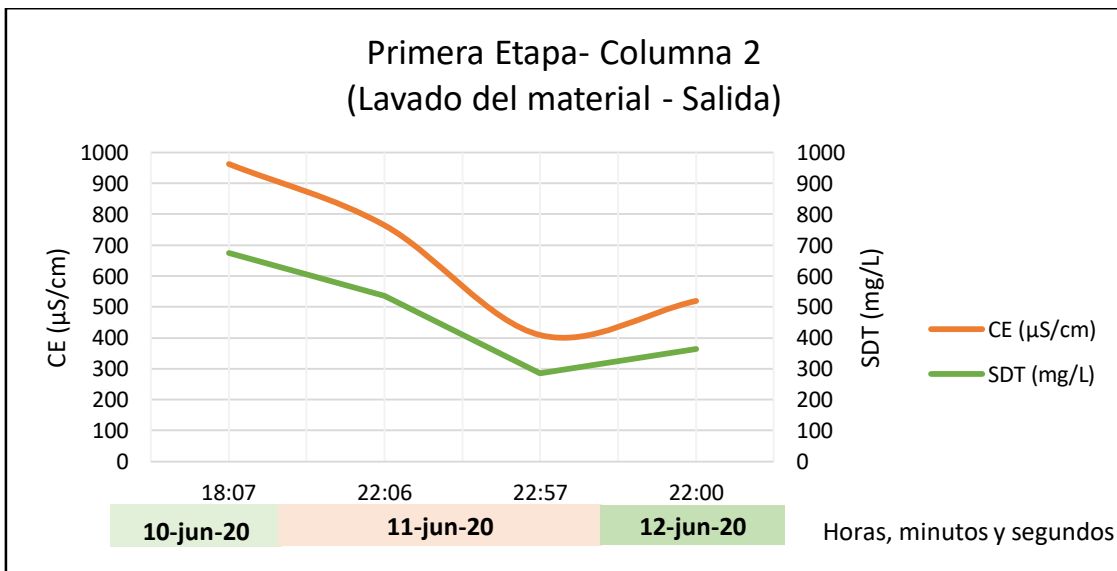


Figura 5-8 Resultados de CE Y SDT, Columna 2, Etapa I.

5.4.1.4 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 2

El potencial de hidrogeno para la columna 2 de la etapa 1 (Figura 5-9) muestra mínimas variaciones entre 8.24 y 8.48, por lo que se considera sin cambios significativos.

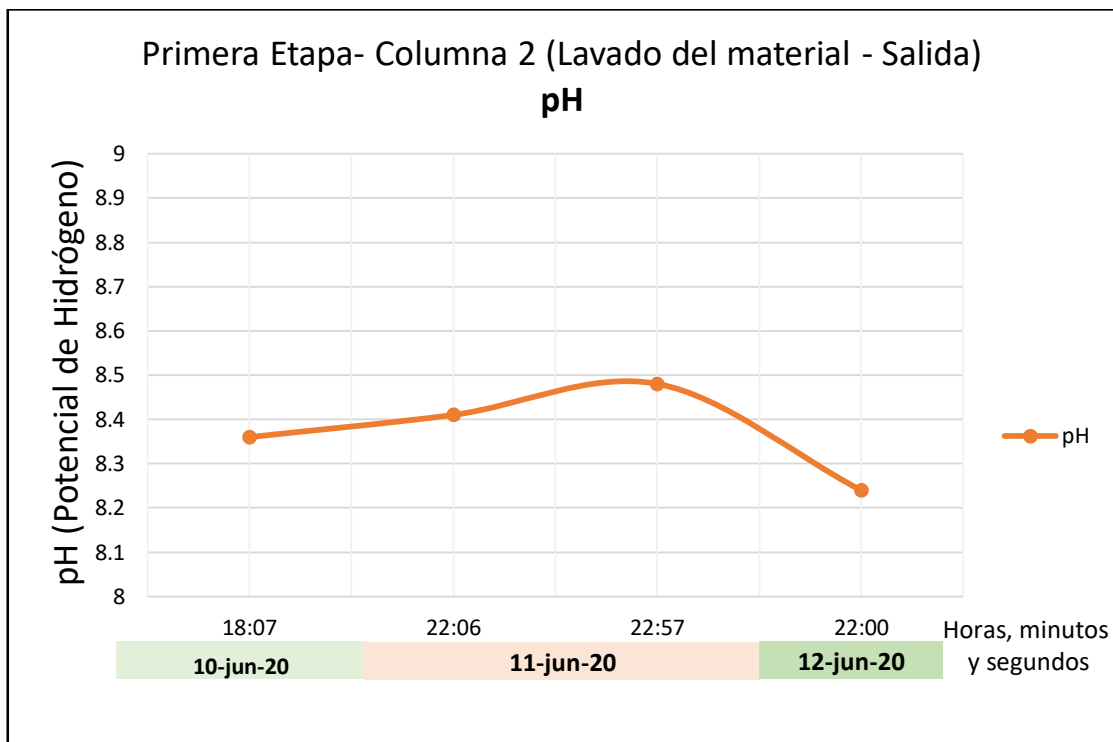


Figura 5-9 Resultados de pH, Columna 2, Etapa I.

5.4.1.5 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 3

En cuanto a la columna 3 (Figura 5-10) se puede observar una conductividad eléctrica inicial de 1256 $\mu\text{S}/\text{cm}$, más alta comparada con las anteriores dos columnas; conforme el material se fue lavando con el agua desmineralizada a su paso por las columnas, existió un decremento en este parámetro hasta un valor promedio cercano a los 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos valores implican la remoción de sales disueltas así como los Sólidos Disueltos Totales que se ven en la muestra ya que es directamente proporcional a la Conductividad Eléctrica.

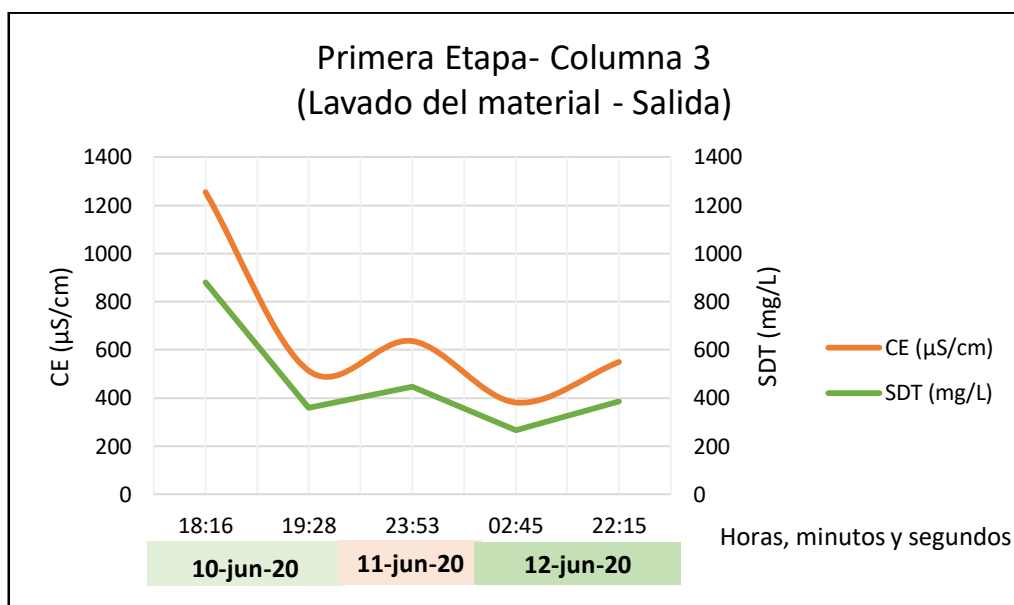


Figura 5-10 Resultados de CE y SDT, Columna 3, Etapa I.

5.4.1.6 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 3

En lo que respecta a la columna 3 como se muestra en la Figura 5-11, el pH presentó también mínimas variaciones dentro de un rango de 8.1 a 8.5.

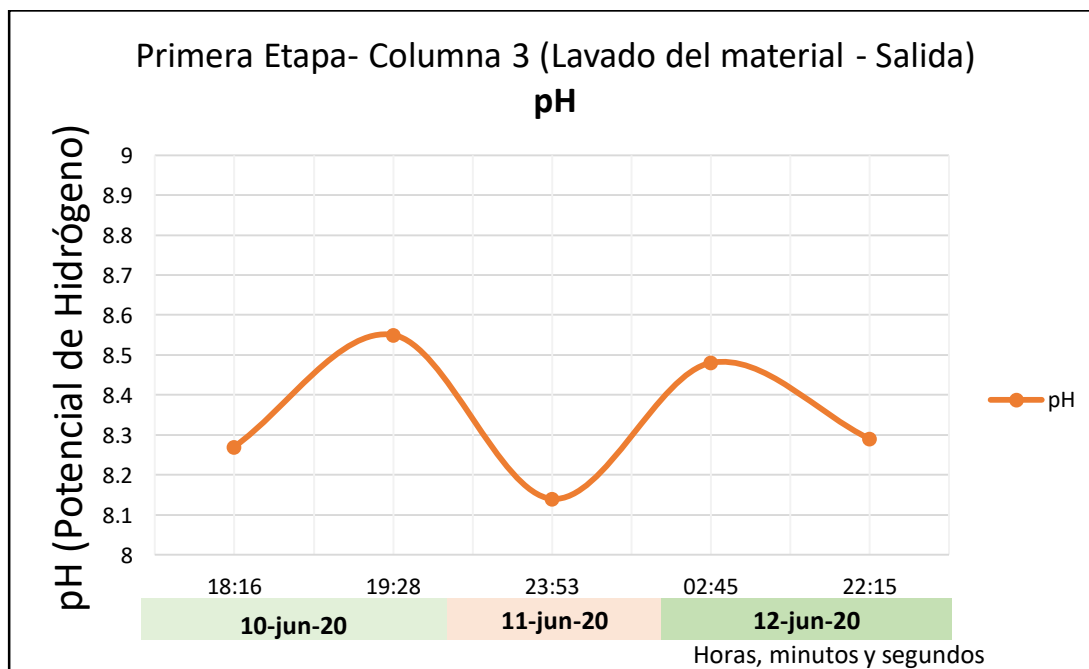


Figura 5-11 Resultados de pH, Columna 3, Etapa I.

5.4.1.7 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 4

Los resultados de la columna 4 tuvieron variaciones con respecto a la conductividad debido al que el material fue empacado 2 veces para igualar la compactación en las 5 columnas. Una vez empacado nuevamente se midió la conductividad, con el material húmedo y se obtuvo un valor inicial de conductividad eléctrica de 910 $\mu\text{S/cm}$ hasta llegar a 486 $\mu\text{S/cm}$. Con el reacomodo del material se obtuvo nuevamente la conductividad eléctrica ahora resultando la Conductividad Eléctrica en 782 $\mu\text{S/cm}$ hasta obtener un valor de 555 $\mu\text{S/cm}$, valor correspondiente a 388 mg/l de Sólidos Disueltos Totales (Figura 5-12).

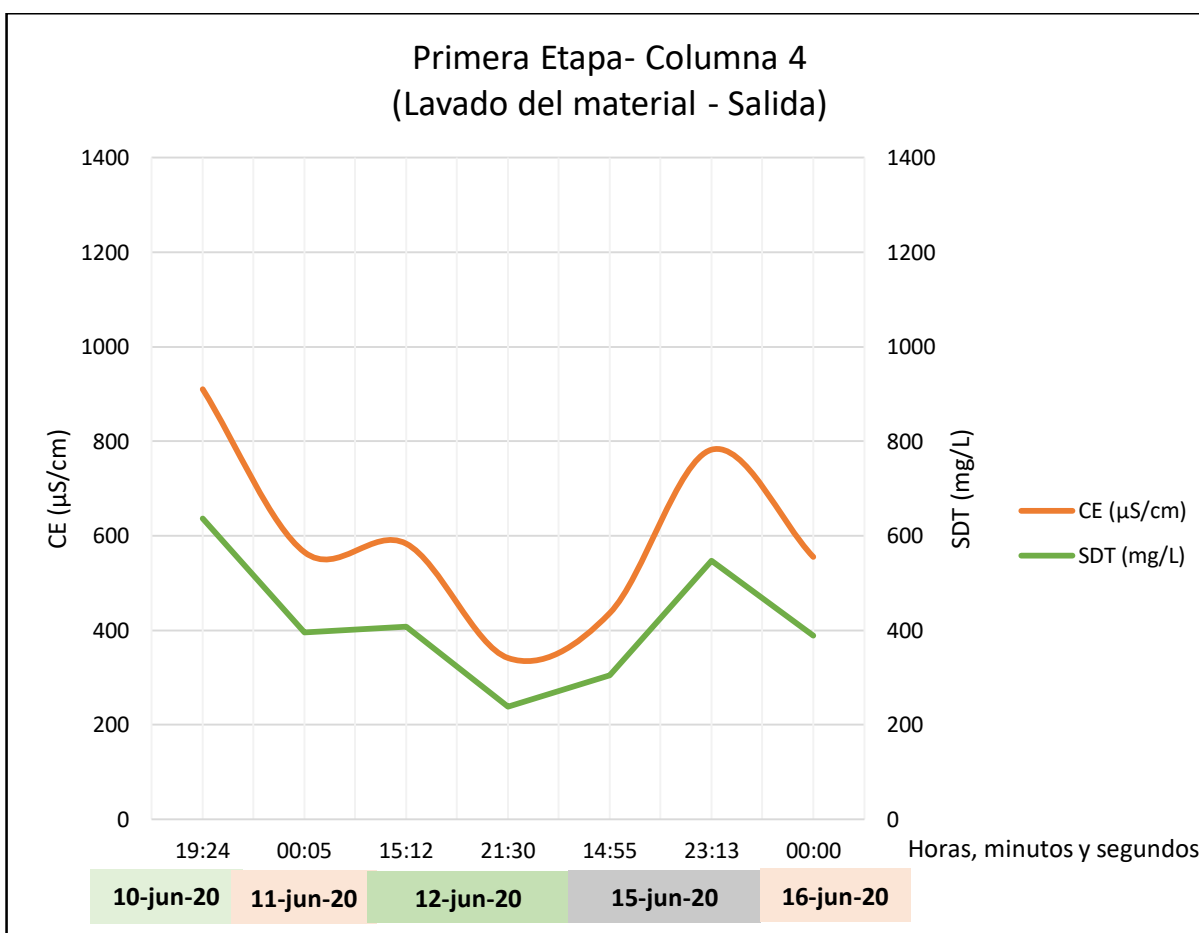


Figura 5-12 Resultados de CE y SDT, Columna 4, Etapa I.

5.4.1.8 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 4

Como se mencionó con anterioridad, la columna fue empacada 2 veces y durante el lavado se observó una ligera tendencia del pH a incrementarse ligeramente desde 8 a 8.42, como se muestra en la Figura 5-13.

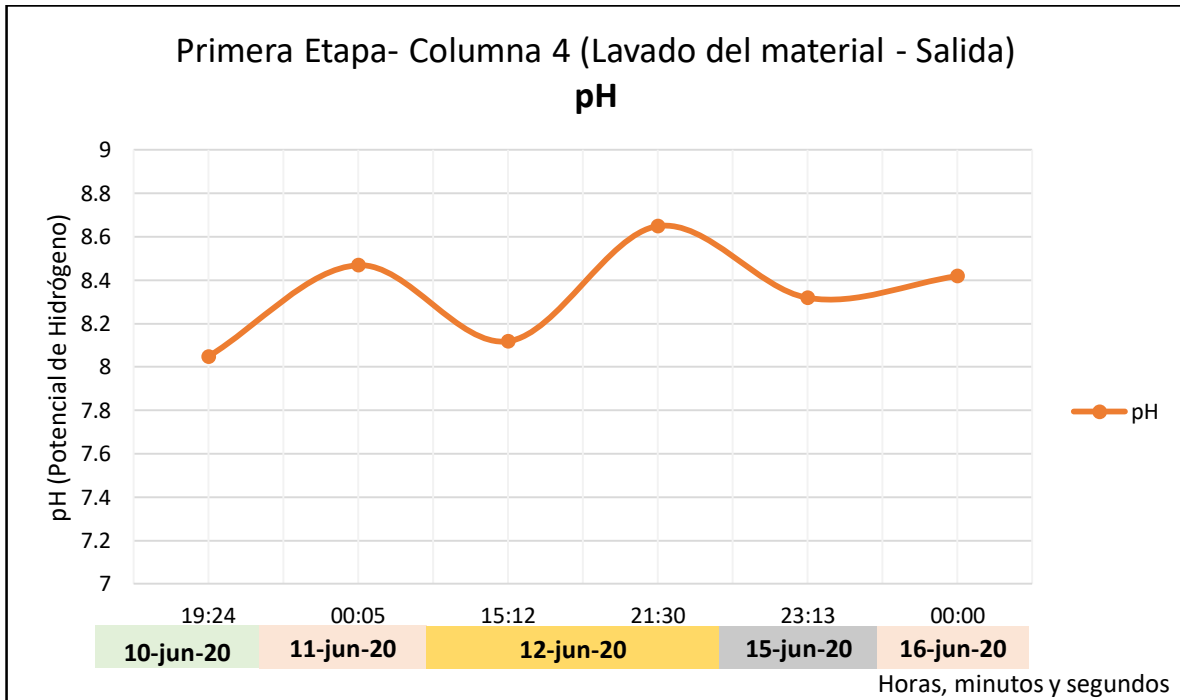


Figura 5-13 Resultados de pH, Columna 4, Etapa I.

5.4.1.9 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 5

La columna 5 al igual que la columna 4 requirió un reacomodo y nuevo empacamiento para compactar el material, por lo que se observaron fluctuaciones en estos parámetros. La medición inicial de Conductividad Eléctrica durante esta etapa manifestó una tendencia general a disminuir desde un valor máximo de 809 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (obtenido después del segundo reacomodo del suelo en la columna) hasta un mínimo valor de 227 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las fluctuaciones observadas se muestran en la Figura 5-14.

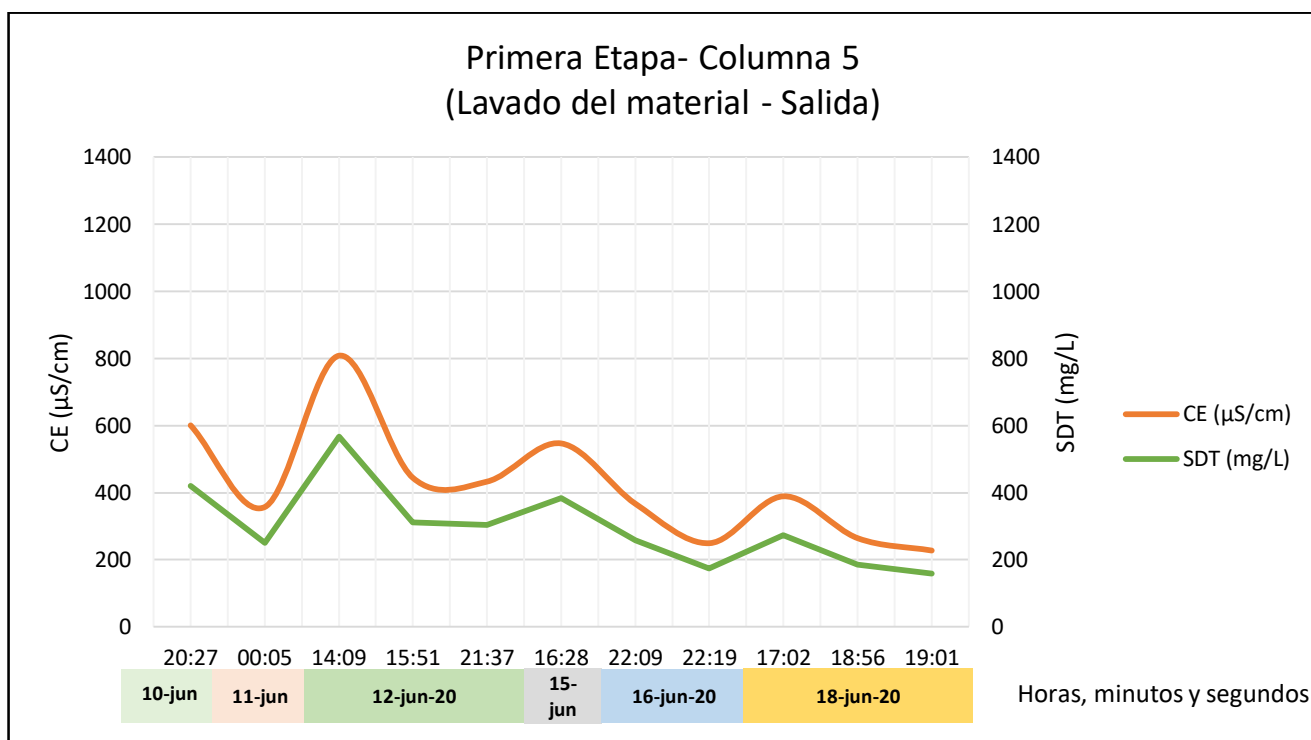


Figura 5-14 Resultados de CE y SDT, Columna 5, Etapa I.

5.4.1.10 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 5

Los resultados del Potencial de Hidrógeno (pH) que se muestran en la Figura 5-15 indican fluctuaciones mínimas en el rango de 8.28 a 8.65, con un valor final de 8.43.

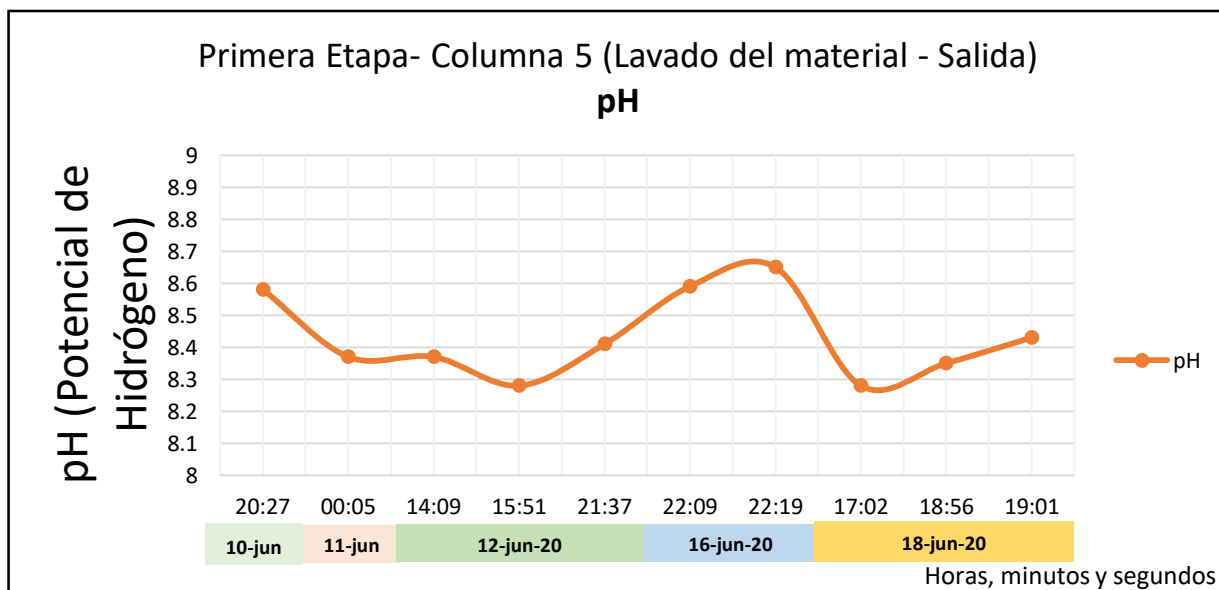


Figura 5-15 Resultados de pH, Columna 5, Etapa I.

5.4.2 Etapa II. Regulación del caudal

El objetivo de las pruebas realizadas en esta etapa fue la regulación del caudal de salida en las columnas hasta obtener velocidades de flujo que, en función del área de la sección transversal de las mismas, se ajustaran a valores de conductividad hidráulica típicos de arenas limosas, es decir, valores de k entre 0.4 y 0.6 m/d. De acuerdo a estas metas, los flujos de infiltración a través del material de empaque fueron ajustado mediante la manipulación de las válvulas de salida a caudales que quedaran dentro del intervalo 130 a 200 ml/h, como se describe a continuación.

5.4.2.1 Resultados y discusión de la regulación del caudal Columna 1

Los resultados obtenidos al regular el caudal en esta columna se muestran en la Figura 5-16, en donde se observan las grandes variaciones iniciales, hasta la estabilización final en caudales cercanos a un valor promedio de 150 ml/h.

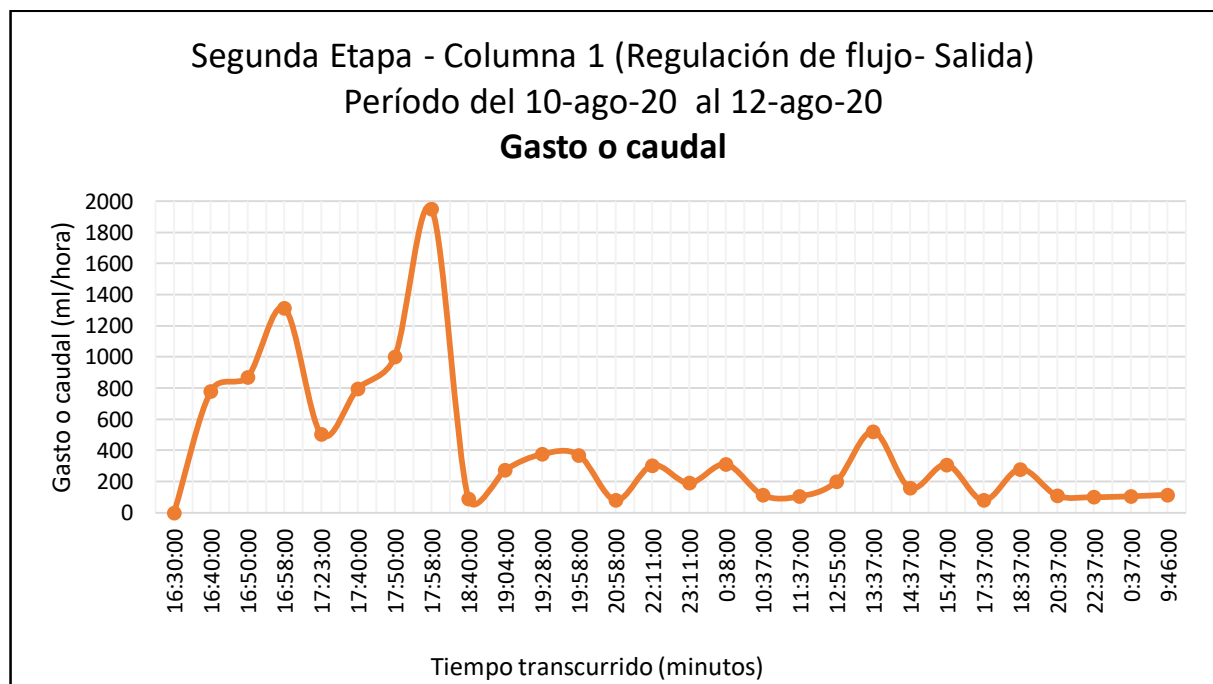


Figura 5-16 Caudal de la Columna 1, Etapa II.

5.4.2.2 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 1

Durante esta etapa se continuó con la medición de los parámetros de control de Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales, donde hubo un descenso gradual al seguir alimentando la columna con agua desmineralizada hasta obtener un valor de 206 $\mu\text{S}/\text{cm}$, periodo en el que se consideró estabilizado el sistema (Figura 5-17).

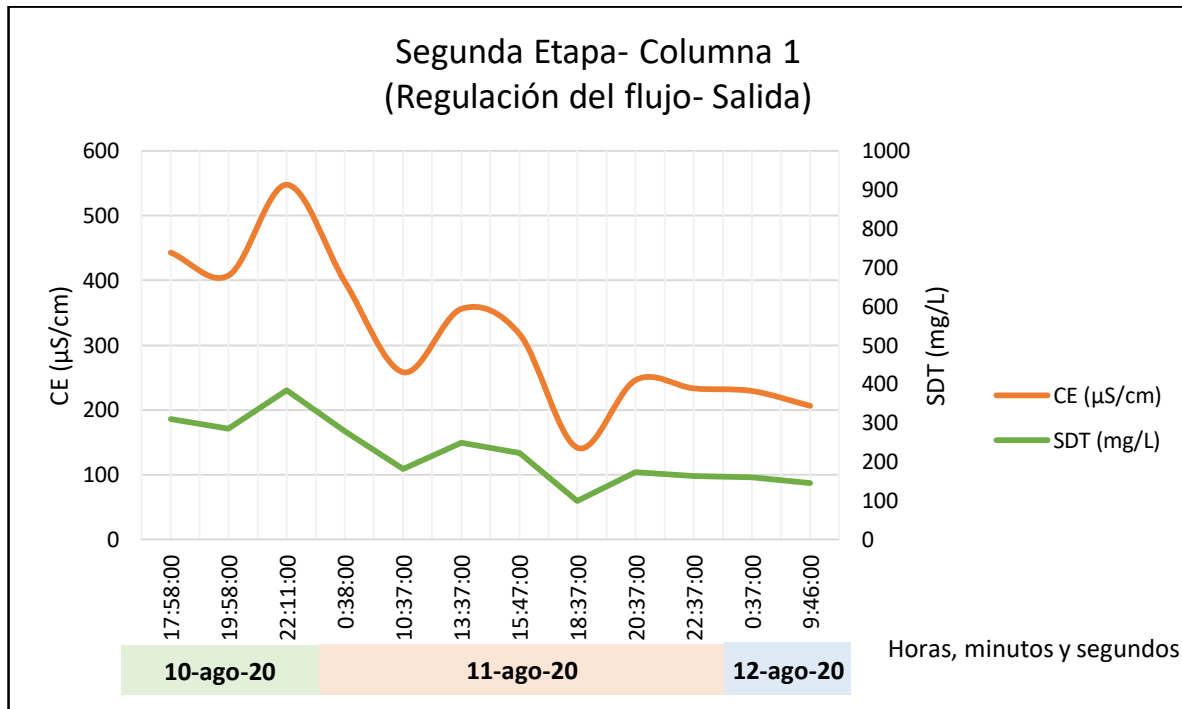


Figura 5-17 Resultados de CE y SDT, Columna 1, Etapa II.

5.4.2.3 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 1

Los valores de este parámetro mostraron fluctuaciones notables coincidentes con las variaciones iniciales en el gasto. Sin embargo, se logró la estabilización con valores de pH alrededor de 8.3. La última medición antes de comenzar la alimentación con el agua de lluvia arrojó un valor de 8.06 como se muestra en la Figura 5-18.

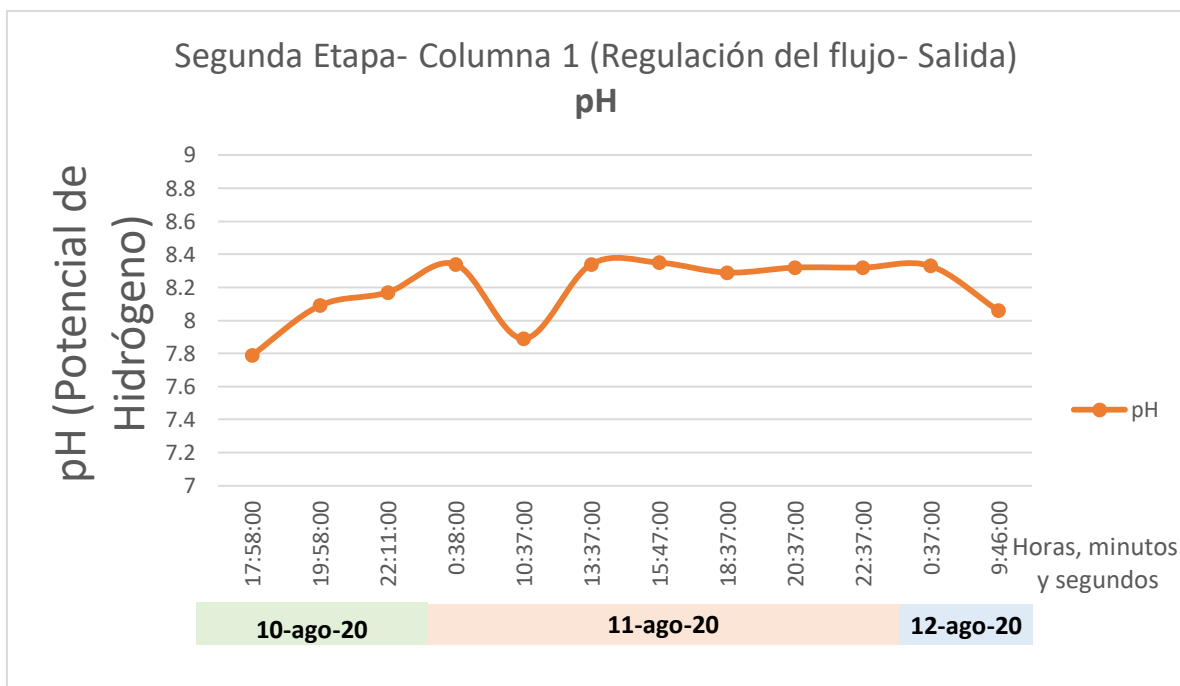


Figura 5-18 Resultados de pH, Columna 1, Etapa II.

5.4.2.4 Regulación del caudal en la Columna 2

En el caso de la columna 2, el flujo logró regularse a 127 ml/hora, lo cual se asemeja mucho al flujo en la columna 1 que alcanzó un valor final de 115 ml/hora. Lo anterior indica que se logró una similitud con el flujo en condiciones naturales del tipo de material en estudio (Figura 5-19).

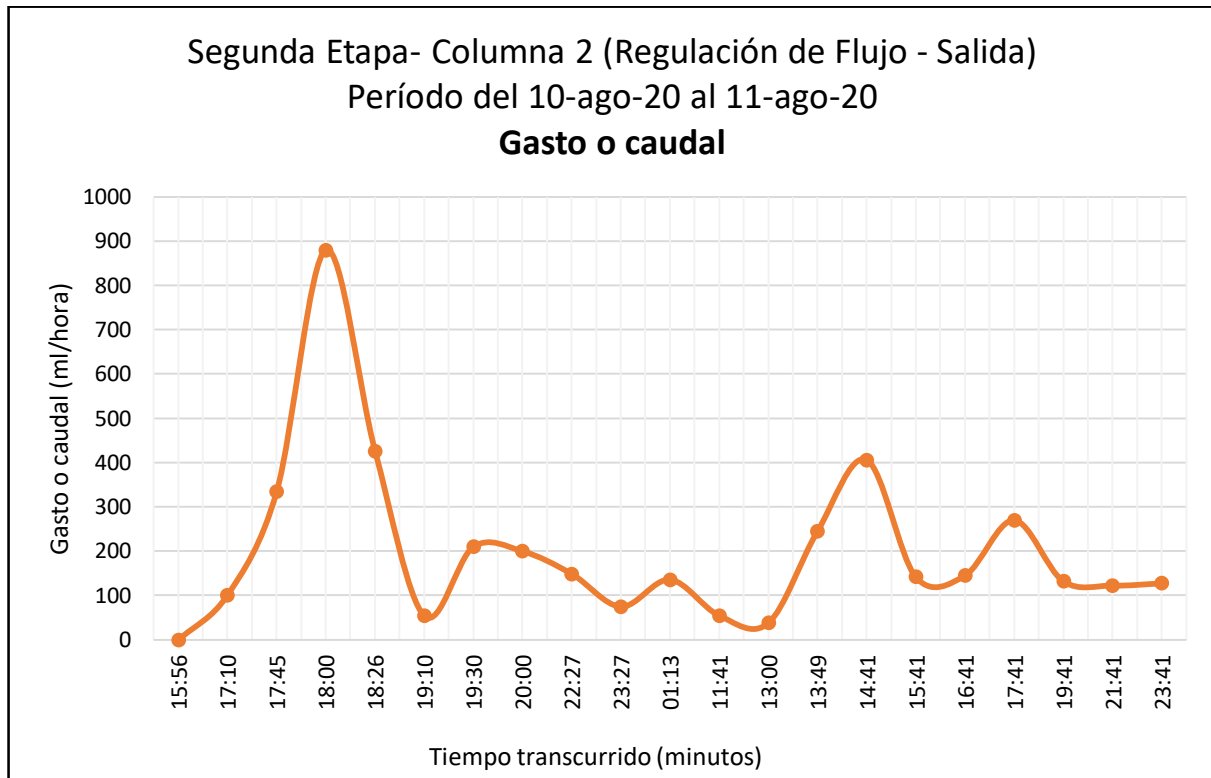


Figura 5-19 Caudal de la Columna 2, Etapa II.

5.4.2.5 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 2

En relación con la columna 2, durante el periodo comprendido entre el 12-jun-20 al 10-ago-20 el material se mantuvo saturado con agua tridestilada dando como resultado un valor de Conductividad Eléctrica de 519 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este parámetro mostró un decremento hasta 236 $\mu\text{S}/\text{cm}$ donde se estabilizó el sistema para continuar la siguiente etapa experimental con la alimentación del agua proveniente de un proceso de destilación solar de la Planta de Tratamiento Norte (Figura 5-20).

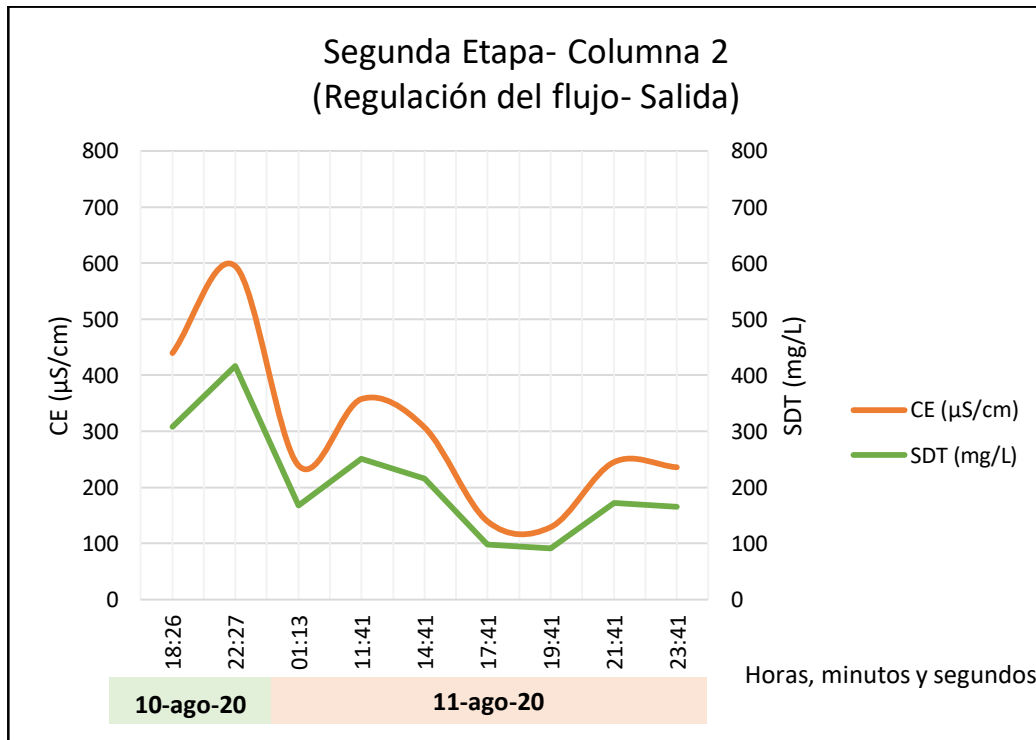


Figura 5-20 Resultados de CE y SDT, Columna 2, Etapa II.

5.4.2.6 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 2

Los valores de pH en este período presentaron una tendencia a incrementarse ligeramente desde 8.07 hasta un valor de 8.45 como se muestra en la Figura 5-21, mostrando así una estabilidad en el sistema.

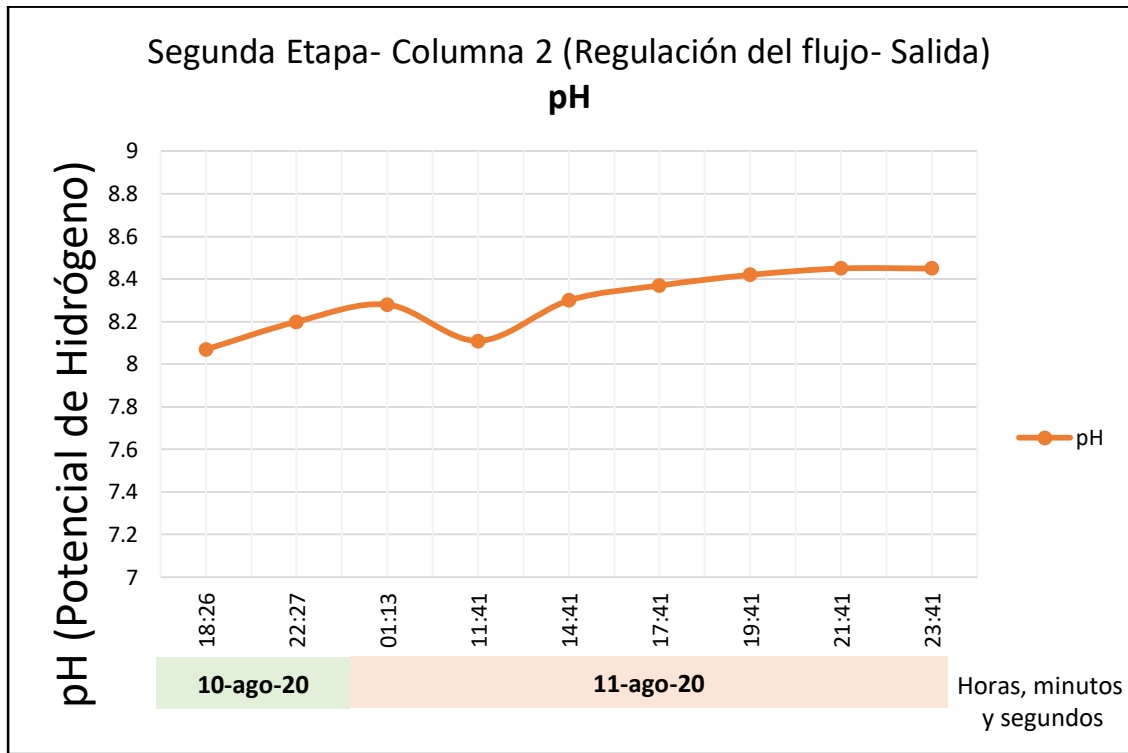


Figura 5-21 Resultados de pH, Columna 2, Etapa II.

5.4.2.7 Regulación del caudal en la Columna 3

En el caso de la columna 3, el flujo logró regularse a 136 ml/hora, lo cual se asemeja mucho a los caudales obtenidos en las columnas 1 y 2. Lo anterior descrito indica que se logró una similitud con el flujo en condiciones naturales del tipo de material en estudio (Figura 5-22).

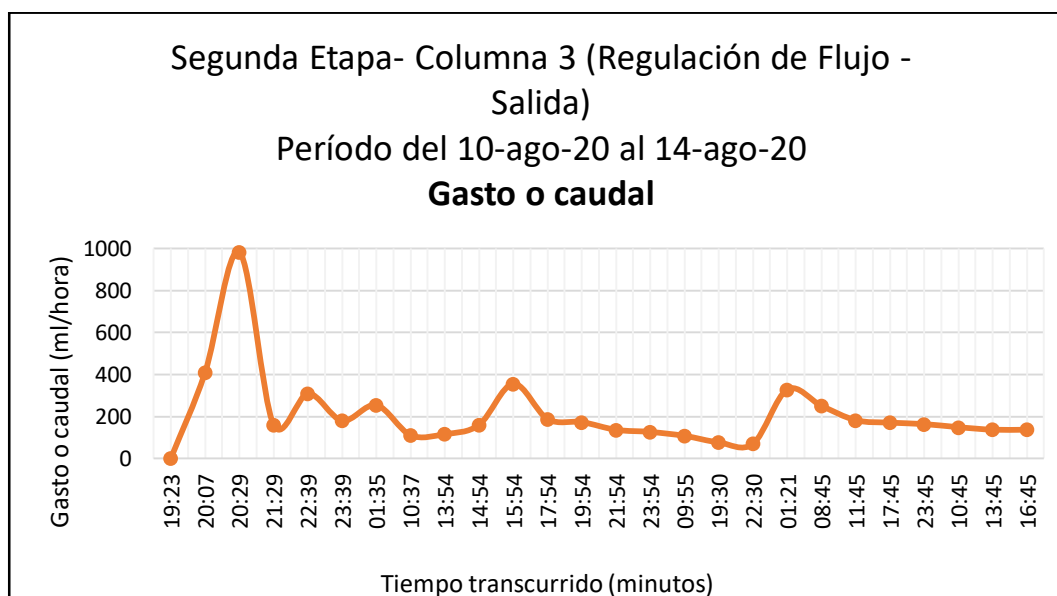


Figura 5-22 Caudal de la Columna 3, Etapa II.

5.4.2.8 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 3

Por lo que se refiere a la Etapa II de la columna 3 se continuó con la medición de los parámetros de control de Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales donde hubo un gradual descenso al seguir alimentando la columna con agua desmineralizada hasta obtener un valor de $153 \mu\text{S}/\text{cm}$. (Figura 5-23).

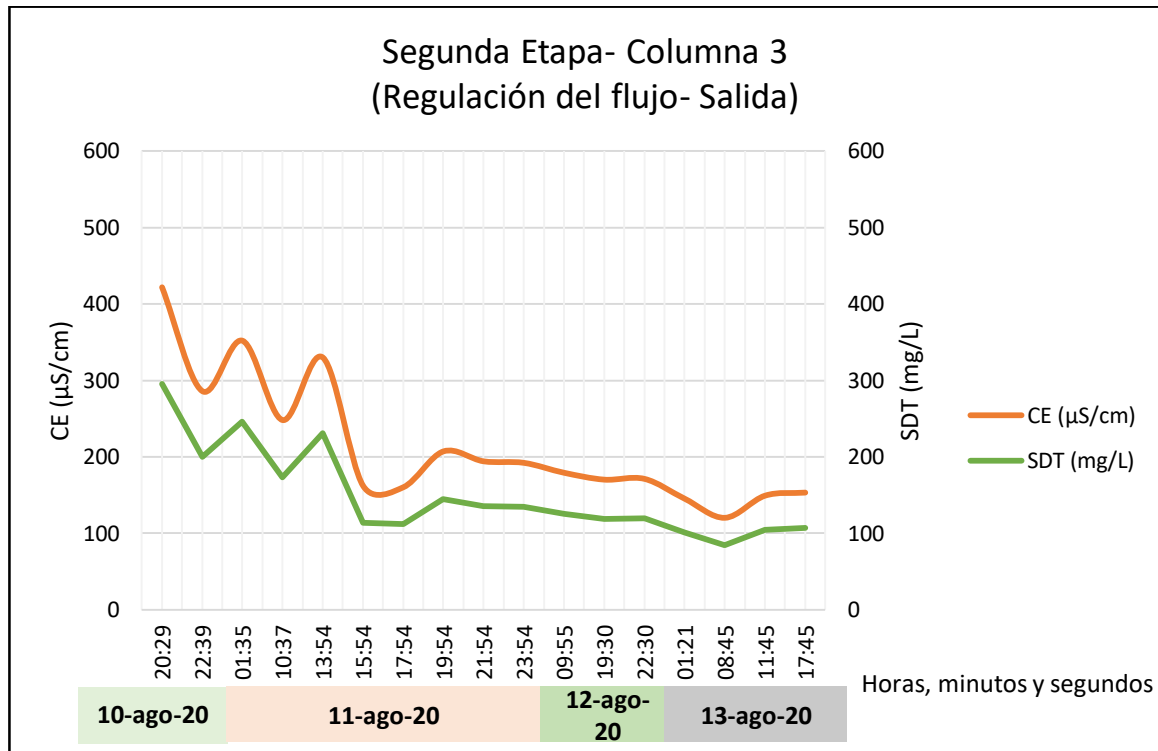


Figura 5-23 Resultados de CE y SDT, Columna 3, Etapa II.

5.4.2.9 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 3

La columna 3 mostró un descenso de pH de 8.29 con respecto a la última medición de la etapa 1 que fue el día 12-jun-20 a 7.98 en el día 10-ago-20. La última medición antes de comenzar la alimentación con el agua procedente del efluente de la Planta de Tratamiento Norte indicó un valor de 8.51 como se muestra en la Figura 5-24.

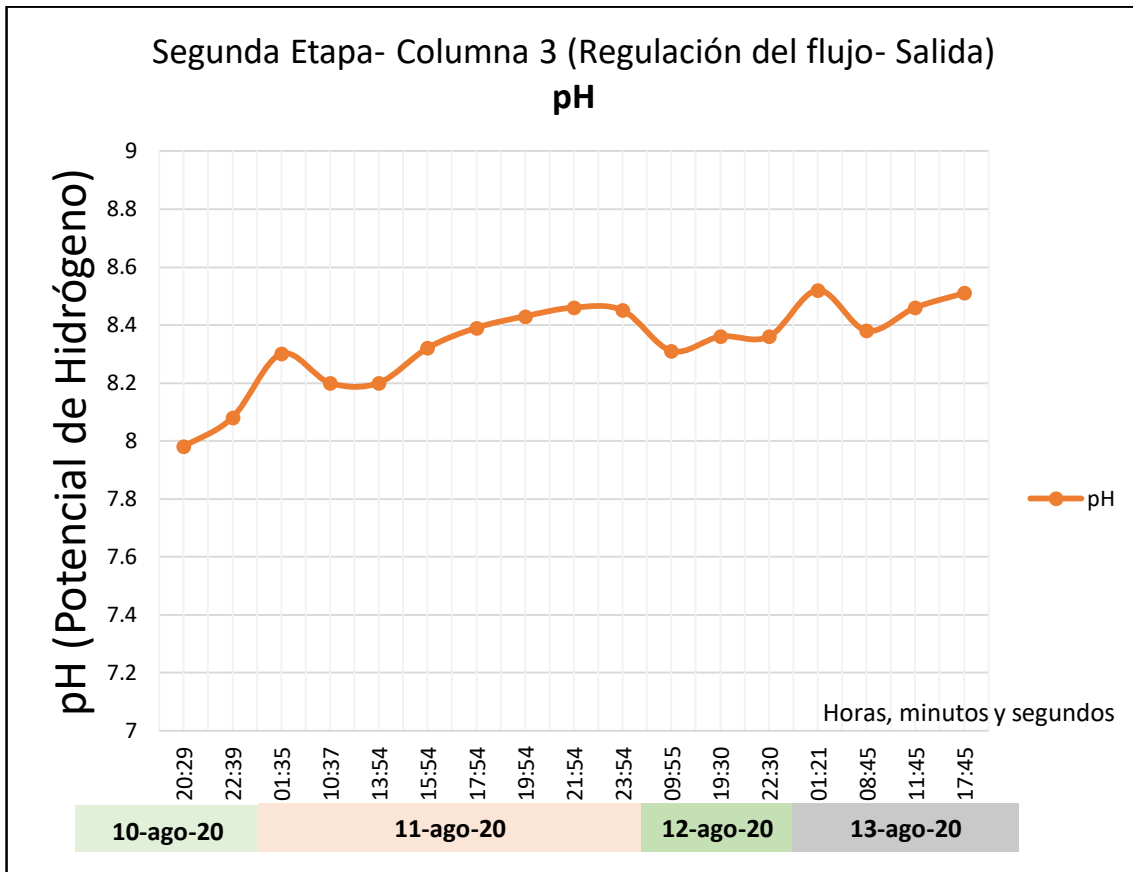


Figura 5-24 Resultados de pH, Columna 3, Etapa II.

5.4.2.10 Regulación del caudal en la Columna 4

Los resultados obtenidos al regular el caudal mediante la manipulación de la llave muestran una condición inicial de $t=0$ a las 19:30:00 del día 10-ago-20 y se muestran en la Figura 5-25, mientras el agua circulaba por las columnas a las 20:41:00 se obtuvo el pico más alto con una unidad de volumen dividida entre tiempo de 318 ml/hora. Para dicho sistema fue difícil la regulación del caudal, ya que la llave no era muy precisa y variaban los caudales aunque la carga de agua en el afluente fuera la misma. La medición final para esta etapa fue de 79 ml/hora.

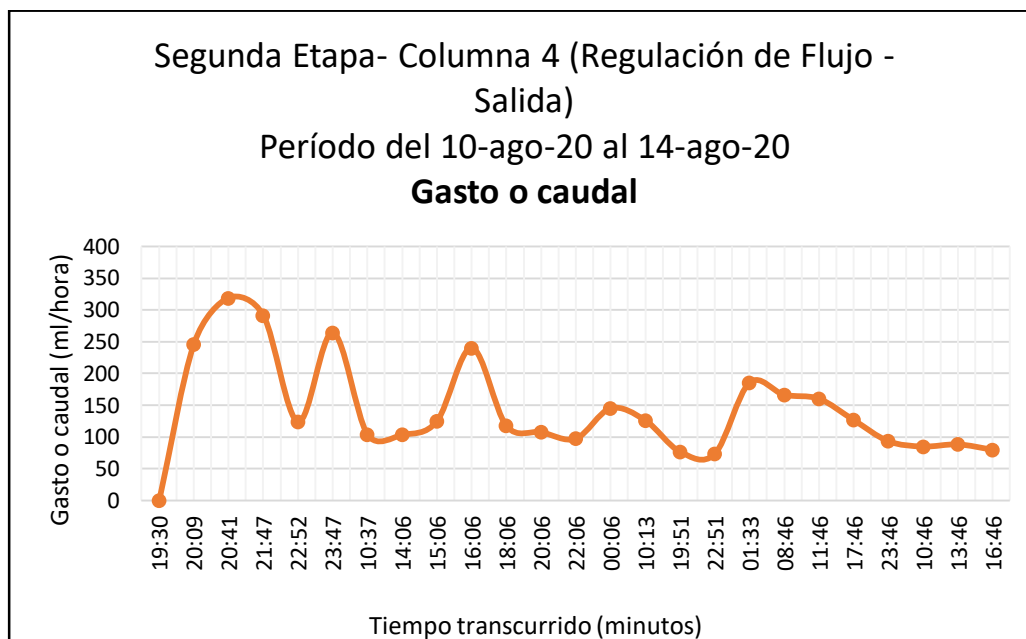


Figura 5-25 Caudal de la Columna 4, Etapa II.

5.4.2.11 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 4

En la columna 4, se repitió el procedimiento de medición al igual que en las columnas 1,2 y 3 con la medición de los parámetros de control de conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales donde hubo un gradual descenso al seguir alimentando la columna con agua desmineralizada hasta obtener un valor de 194 $\mu\text{S}/\text{cm}$ periodo en el que se estabilizó el sistema (Figura 5-26).

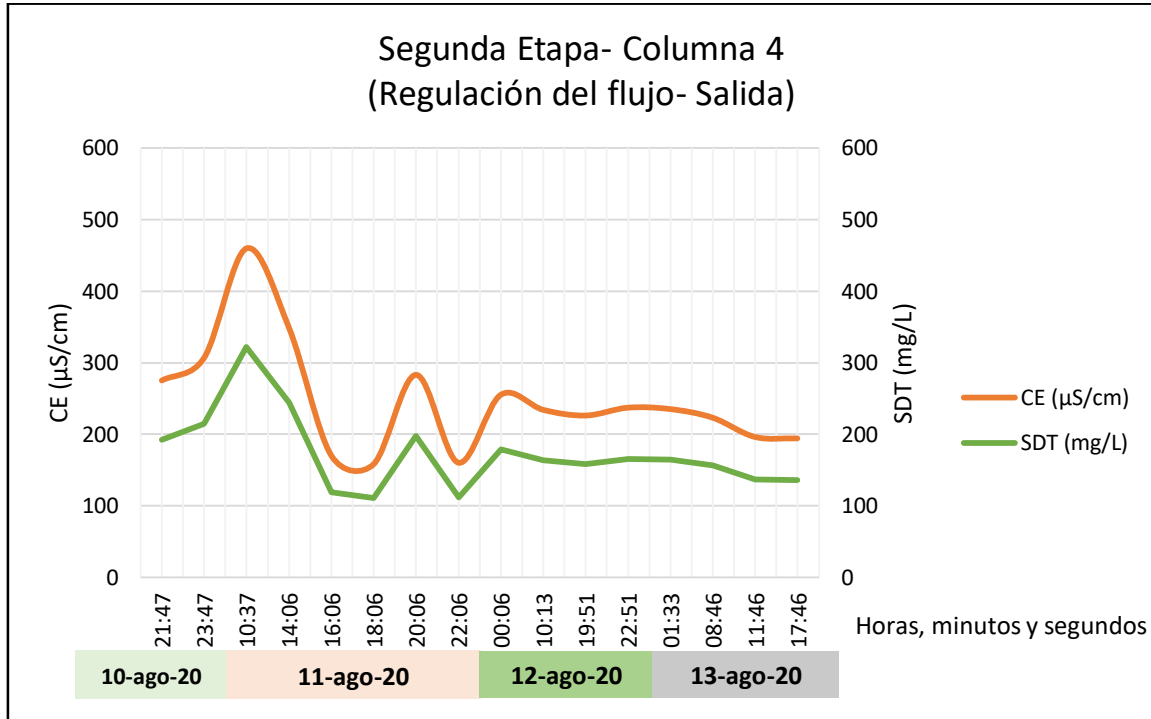


Figura 5-26 Resultados de CE y SDT, Columna 4, Etapa II.

5.4.2.12 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 4

La columna 4 mostró un periodo estable en cuanto a los valores de pH entre el periodo comprendido entre 11-ago-20 al 13-ago-20 con valores cercanos a 8.27 de pH. La última medición antes de comenzar la alimentación con el agua procedente del efluente de la Planta de Tratamiento Sur mostró un valor de 8.45 como se muestra en la Figura 5-27.

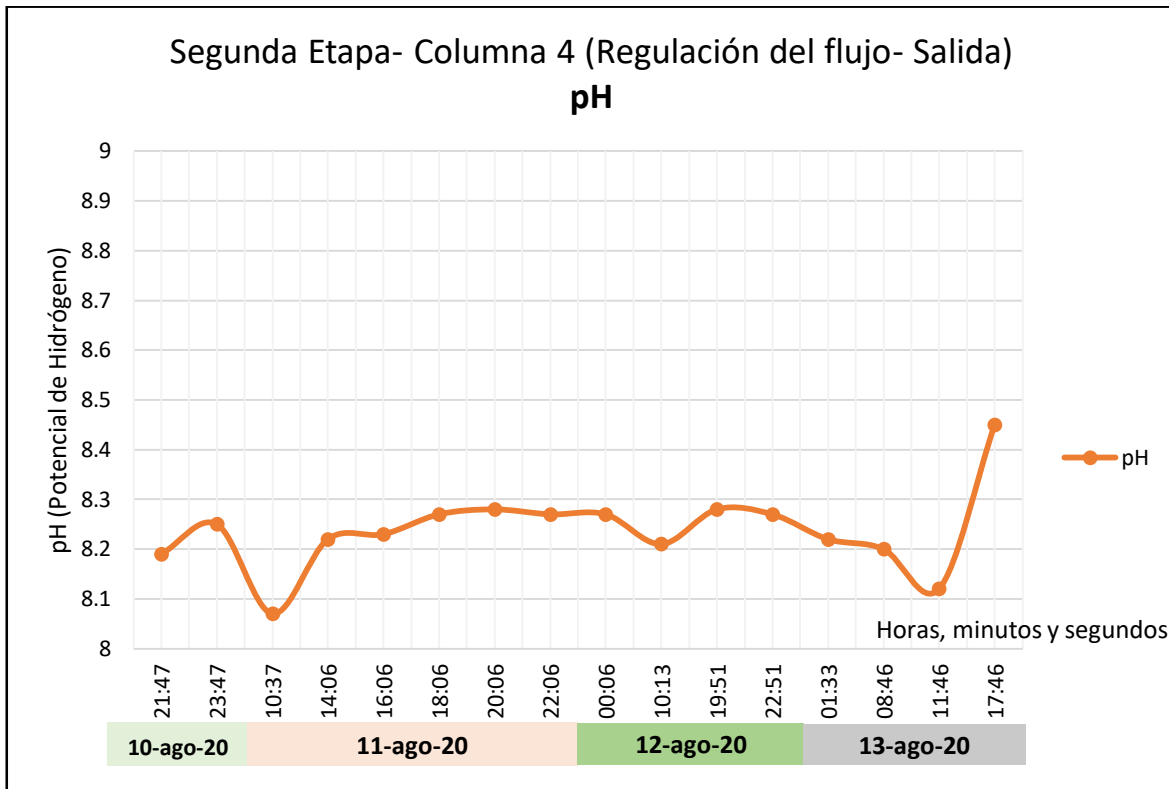


Figura 5-27 Resultados de pH, Columna 4, Etapa II.

5.4.2.13 Regulación del caudal en la Columna 5

Los resultados obtenidos al regular el caudal mediante la manipulación de la llave muestran una condición inicial de $t=0$ a las 20:44:00 del día 10-ago-20 y se muestran en la Figura 5-16, mientras el agua circulaba por las columnas a las 21:56:00 se obtuvo el pico más alto con una unidad de volumen dividida entre tiempo de 774 ml/hora.

Para dicho sistema fue difícil la regulación del caudal, ya que el acomodo de las partículas y el tamaño de grano eran más grandes comparados con la Columna 1, 2, 3 y 4, sin embargo, se logró estabilizar el sistema a 129 ml/hora (Figura 5-28).

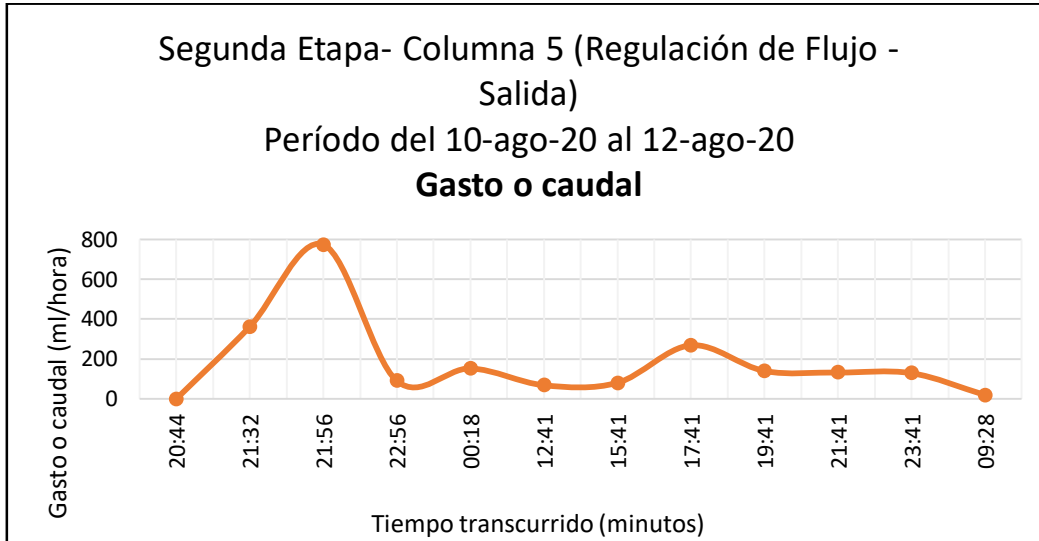


Figura 5-28 Caudal de la Columna 5, Etapa II.

5.4.2.14 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 5

Sobre la Columna 5 se continuó con la medición de los parámetros de control de conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales donde hubo un gradual descenso al seguir alimentando la columna con agua desmineralizada hasta obtener un valor de $171 \mu\text{S}/\text{cm}$ periodo en el que se estabilizó el sistema y disolvió menos sales (Figura 5-29).

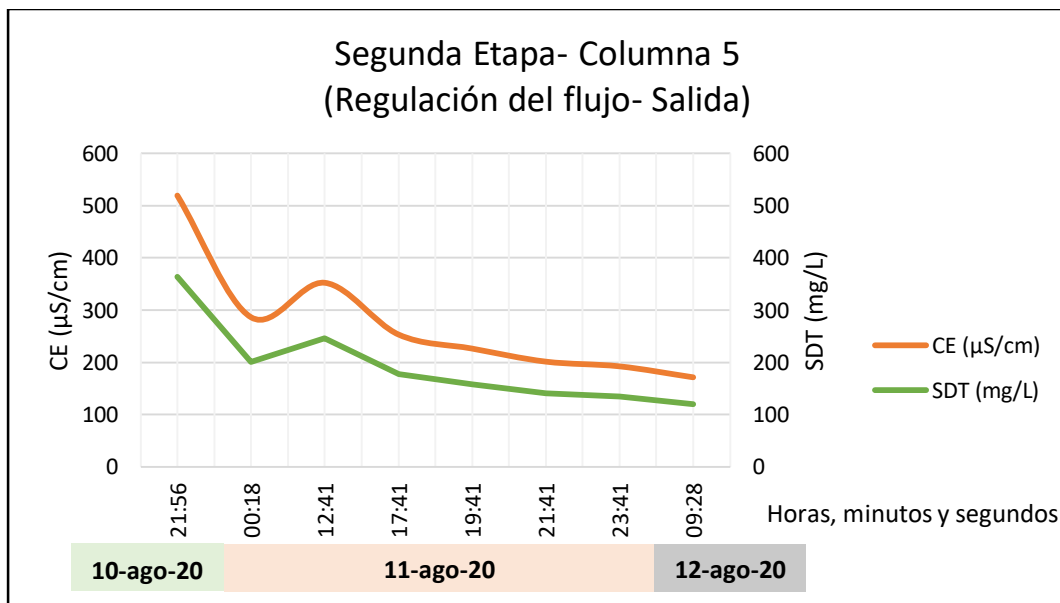


Figura 5-29 Resultados de CE y SDT, Columna 5, Etapa II.

5.4.2.15 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 5

La columna 3 mostró una estabilización en el último valor recabado de pH de 8.29. Los resultados se muestran en la Figura 5-30.

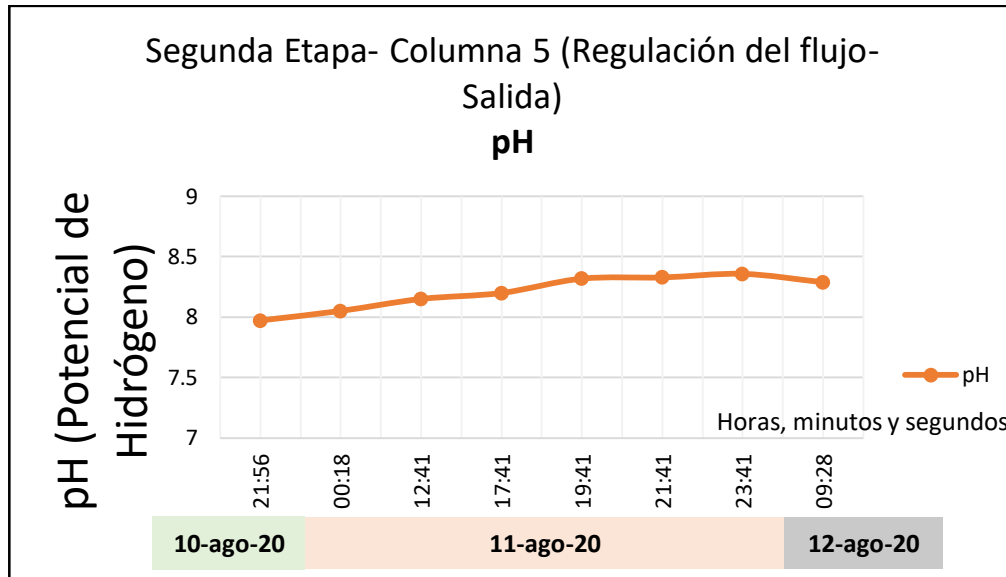


Figura 5-30 Resultados de pH, Columna 5, Etapa II.

5.4.3 Etapa III. Pruebas de recarga con diferentes tipos de agua

5.4.3.1 Alimentación con agua de lluvia (Columna 1)

5.4.3.1.1 Comportamiento del caudal de la Columna 1

Una vez estabilizado el caudal durante la etapa anterior fue importante mantenerlo constante, siendo ésta la etapa más importante del experimento ya que se evaluaron las calidades de los diferentes tipos de agua alimentados. Inicialmente, con el aporte del agua de lluvia, el caudal medido arrojó valores entre 94 ml/hora y 161 ml/hora, dando un promedio aproximado de 130 ml/h, como se puede observar en la Figura 5-31.

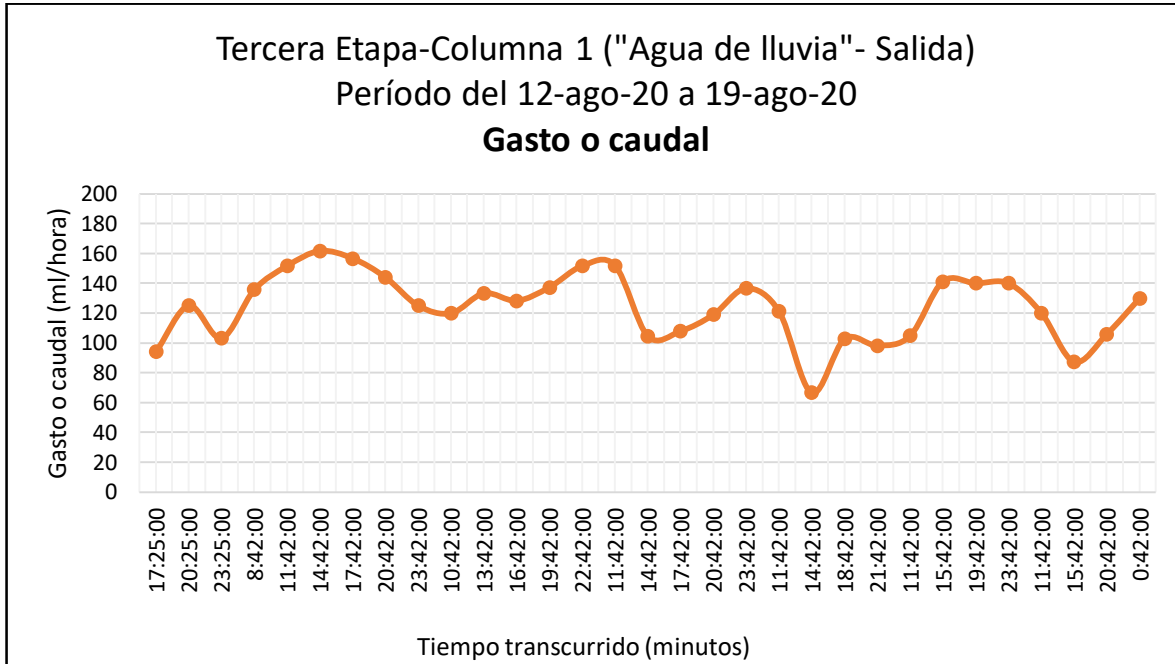


Figura 5-31 Caudal agua de lluvia, Columna 1, Etapa III.

5.4.3.1.2 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 1 (Entrada y Salida)

En esta etapa fue importante la medición de los parámetros tanto de entrada (afluente) como de salida (efluente), para observar las aportaciones del medio durante el proceso de infiltración en condiciones naturales. La Conductividad Eléctrica a la **Entrada** de la columna alimentada por el agua de lluvia permaneció constante con valores cercanos a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ los cuales se observan en la Figura 5-32. En los valores de **Salida** se aprecia que el material en estudio aportaba sales al medio, ya que inicialmente se reportaron valores de 201 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para concluir con 111 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estas variaciones se señalan en la Figura 5-33.

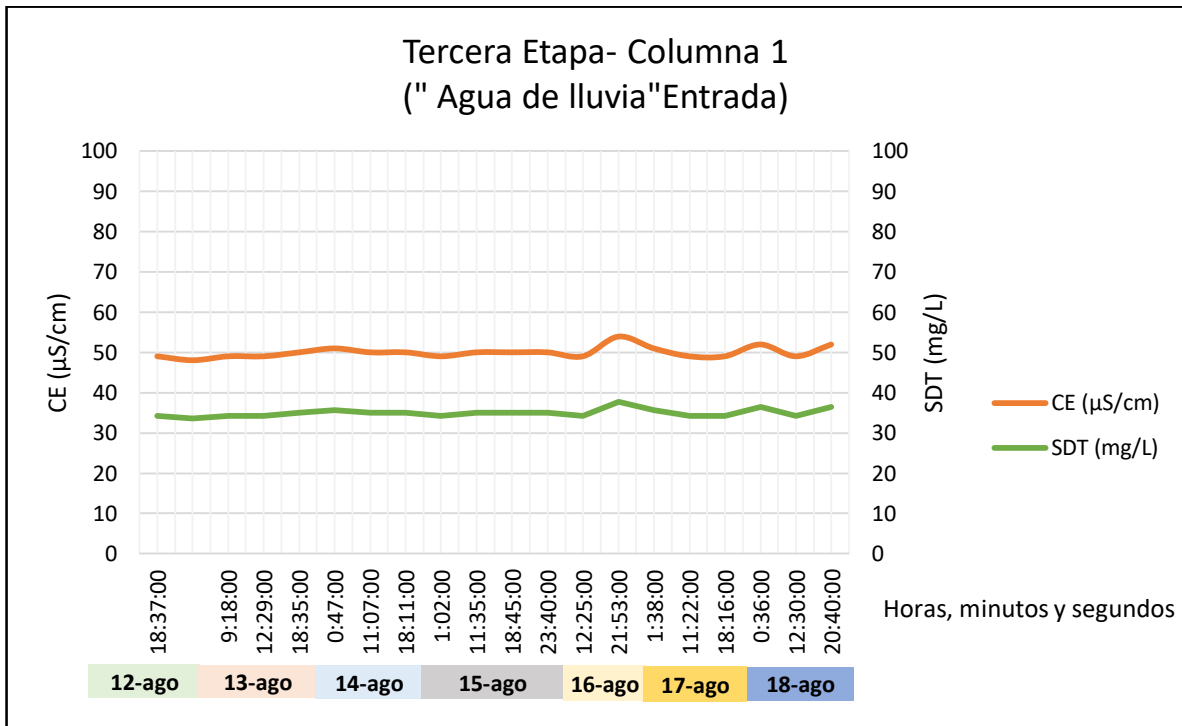


Figura 5-32 Resultados CE y SDT, Entrada Columna 1, Etapa III.

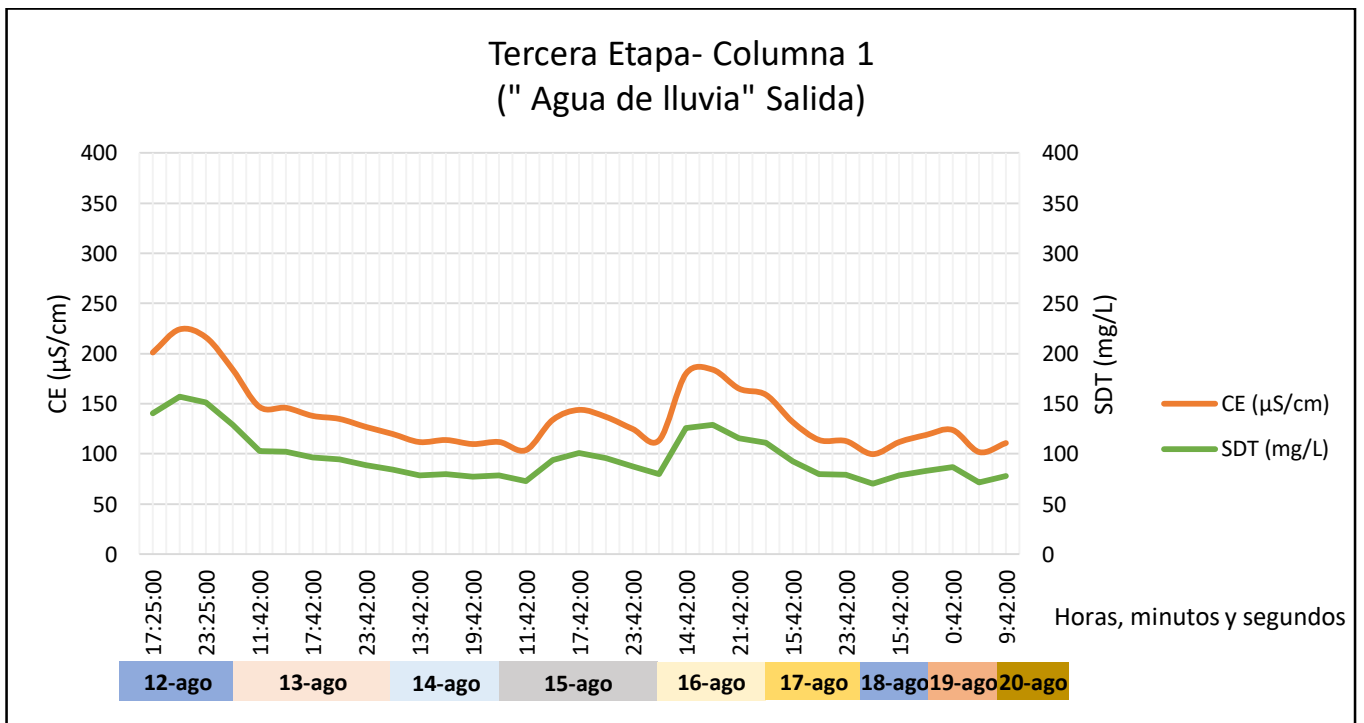


Figura 5-33 Resultados CE y SDT, Salida Columna 1, Etapa III.

5.4.3.1.3 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 1 (Entrada y Salida)

En la alimentación de la columna 1 con agua de lluvia se observan variaciones en los valores de pH entre 6.71 y 7.48 (Figura 5-34). Los resultados a la salida de la columna muestran variaciones entre 7.5 y 8.5 lo cual habla de un pH alcalino, que fue aumentando con la incorporación de sales disueltas al agua al pasar por la columna. Estos datos se presentan en la Figura 5-35.

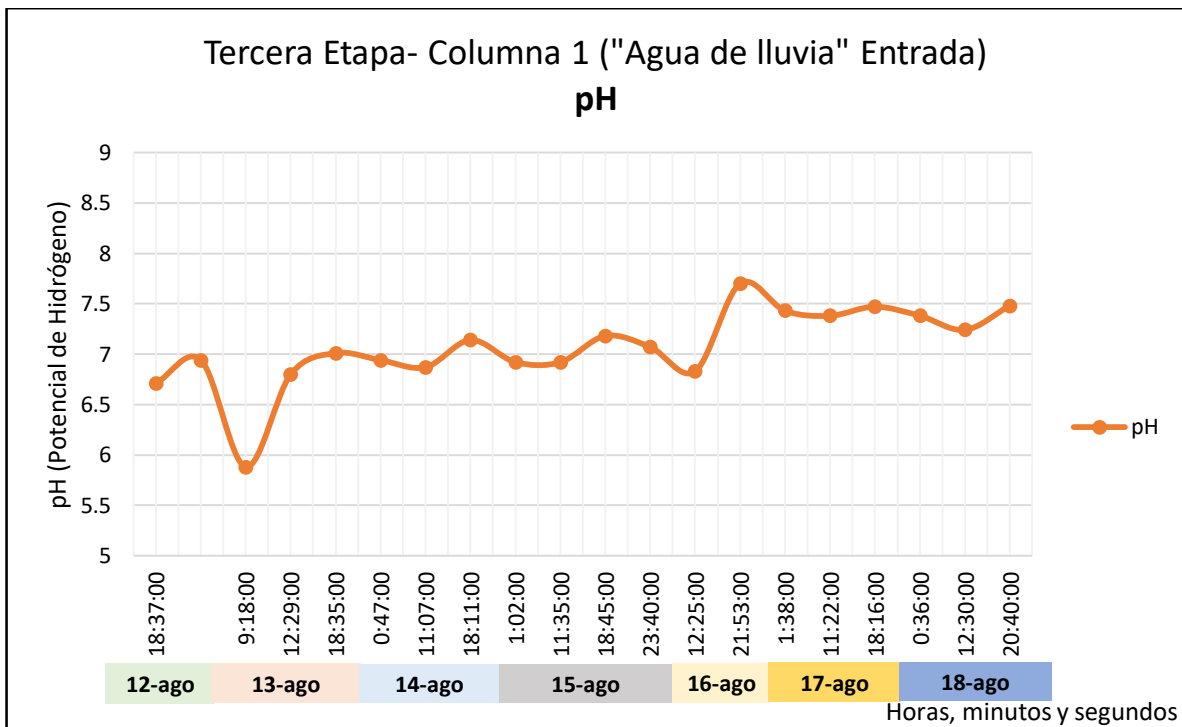


Figura 5-34 Resultados de pH, Entrada Columna 1, Etapa III.

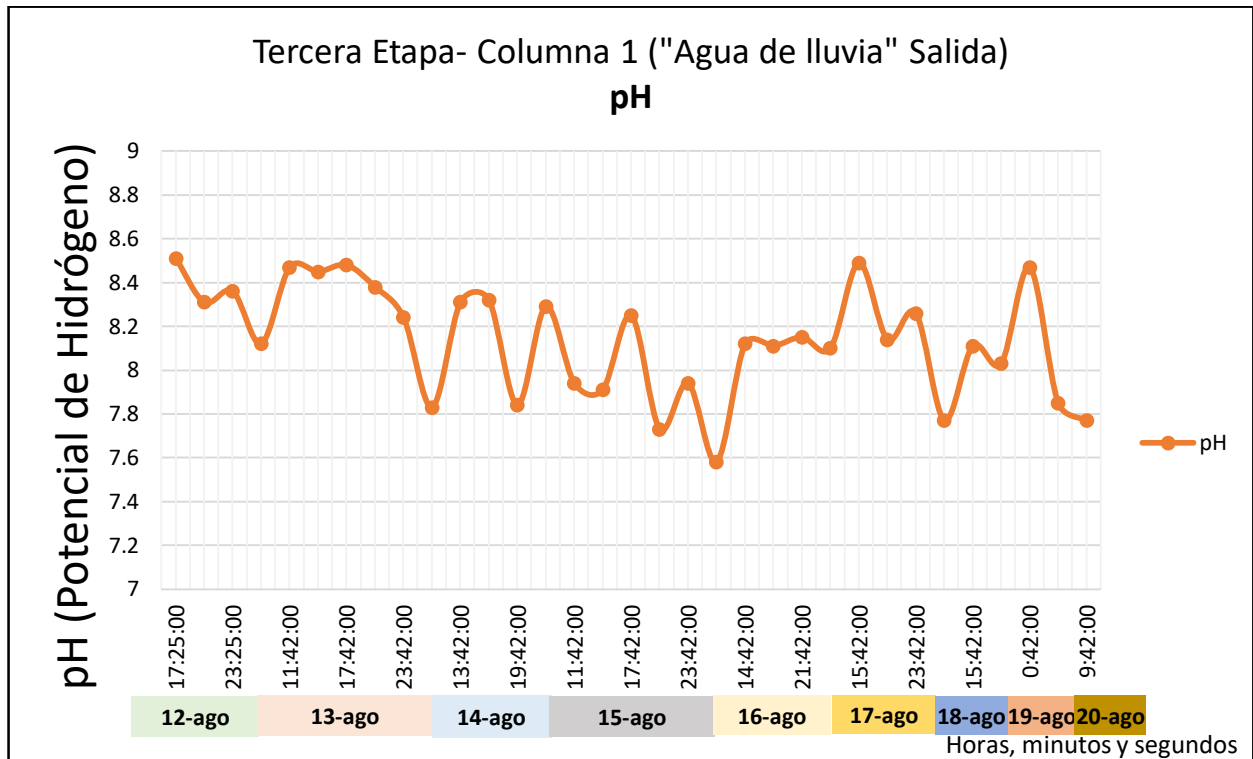


Figura 5-35 Resultados de pH, Salida Columna 1, Etapa III.

5.4.3.2 Alimentación con efluente de la Planta Norte desmineralizado mediante destilación solar (Columna 2)

5.4.3.2.1 Variaciones del caudal en la Columna 2

En las pruebas realizadas con el aporte del agua procedente de un sistema de destilación solar de la Planta Norte las mediciones reportaron un caudal bajo con respecto a las otras columnas. Conforme transcurrió el tiempo no fue posible mantener este parámetro constante, mismo que continuó en descenso hasta valores cercanos a 60 ml/h como puede observarse en la Figura 5-36.

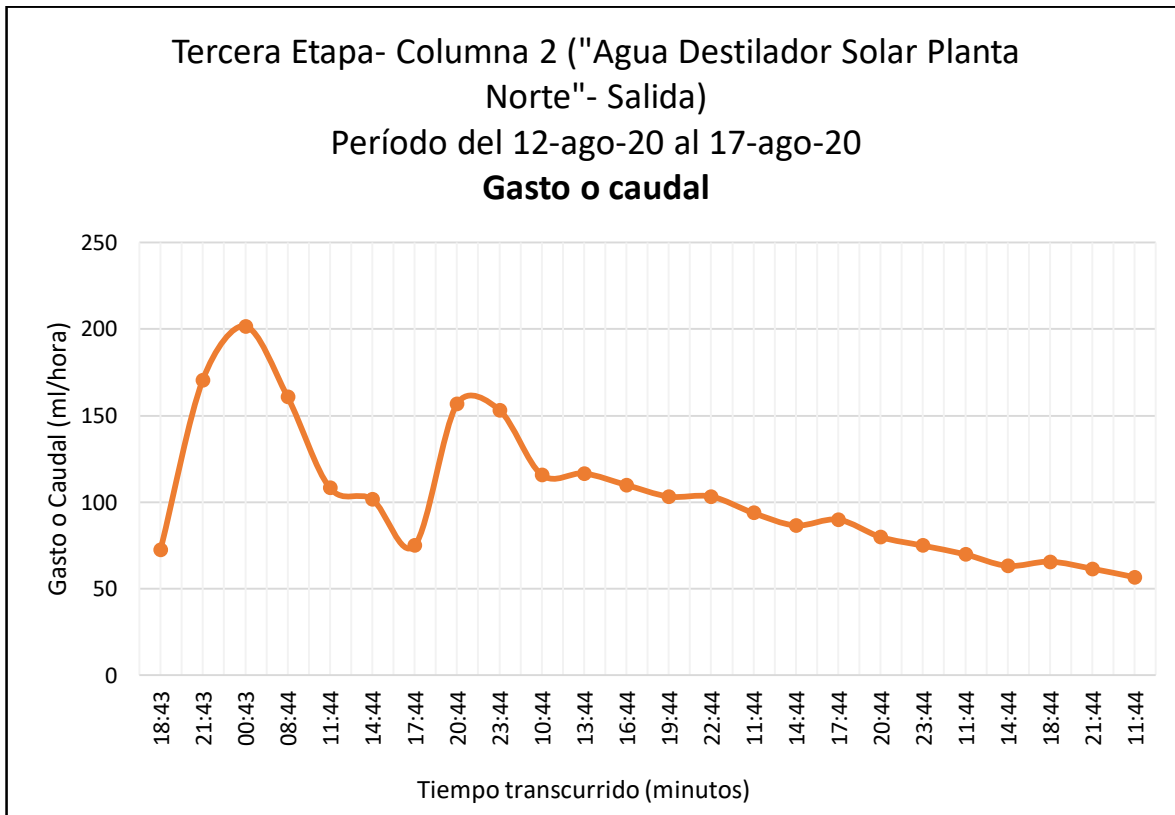


Figura 5-36 Caudal Agua Destilador Solar Planta Norte, Columna 2, Etapa III.

5.4.3.2.2 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 2 (Entrada y Salida)

La Conductividad Eléctrica a la **Entrada** de la columna, al ser alimentada por agua procedente de un sistema de destilación solar de la Planta Norte, permaneció constante con valores entre 173 y 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como puede observarse en la Figura 5-37, mientras que de acuerdo a los valores de **Salida** se observa que el material en estudio aportaba sales al medio, como indican las variaciones desde 221 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta 267 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un pico de 355 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la muestra final colectada. Las variaciones antes descritas se observan en la Figura 5-38.

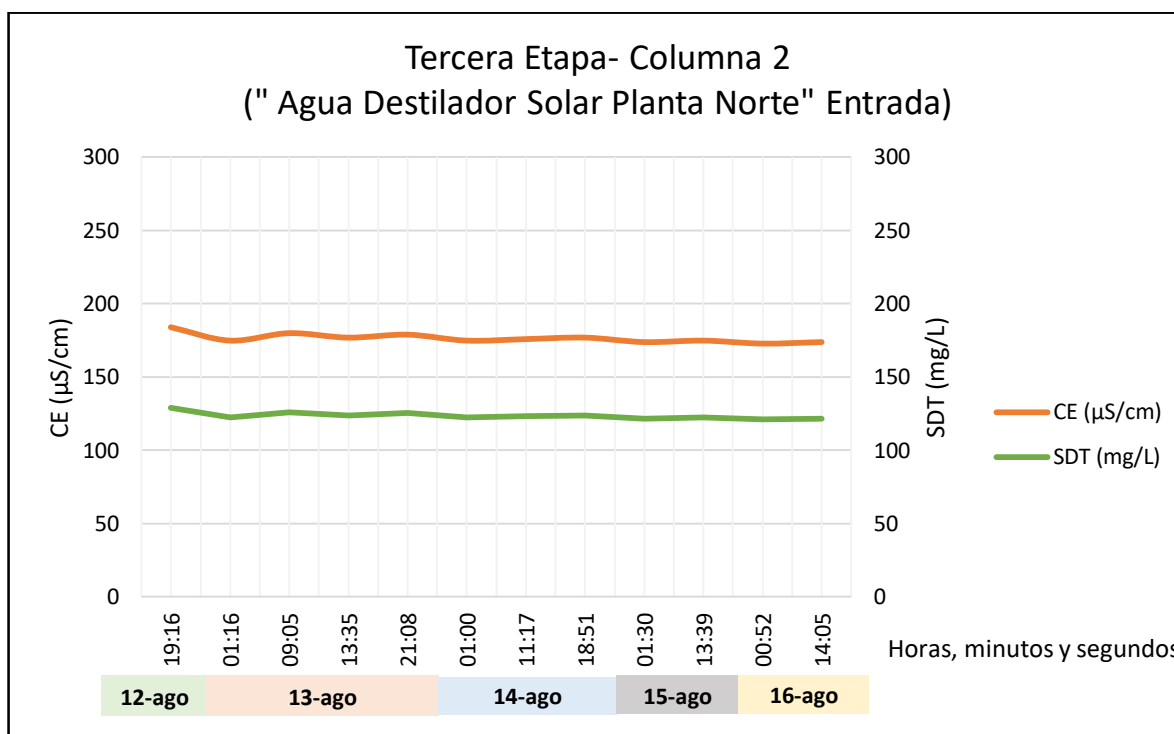


Figura 5-37 Resultados CE y SDT, Entrada Columna 2, Etapa III.

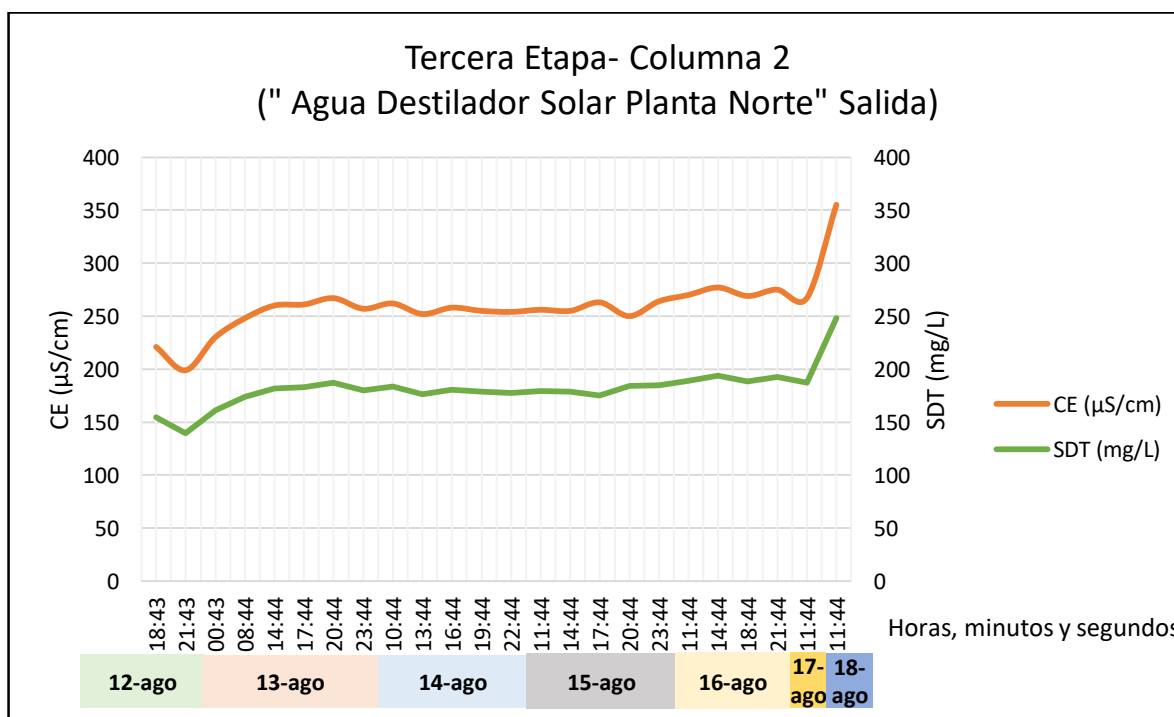


Figura 5-38 Resultados CE y SDT, Salida Columna 2, Etapa III.

5.4.3.2.3 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 2 (Entrada y Salida)

En el afluente de la columna 2 se observan variaciones en los valores de pH desde 5.42 hasta el valor final de 6.09 correspondientes al agua de la Planta Norte sometida a un proceso de destilación solar, lo cual representa el pH más bajo comparado con los otros 3 tipos de agua, incluso que el del agua de lluvia. Los valores de este parámetro se presentan en la Figura 5-39. Por otro lado, en el efluente de la Columna 2 se muestra el incremento del pH a 8.23 hasta finalmente concluir el experimento en esta columna con un valor de 7.86, lo cual hace evidente que el aumento proviene del medio por el que circuló el agua (Figura 5-40).

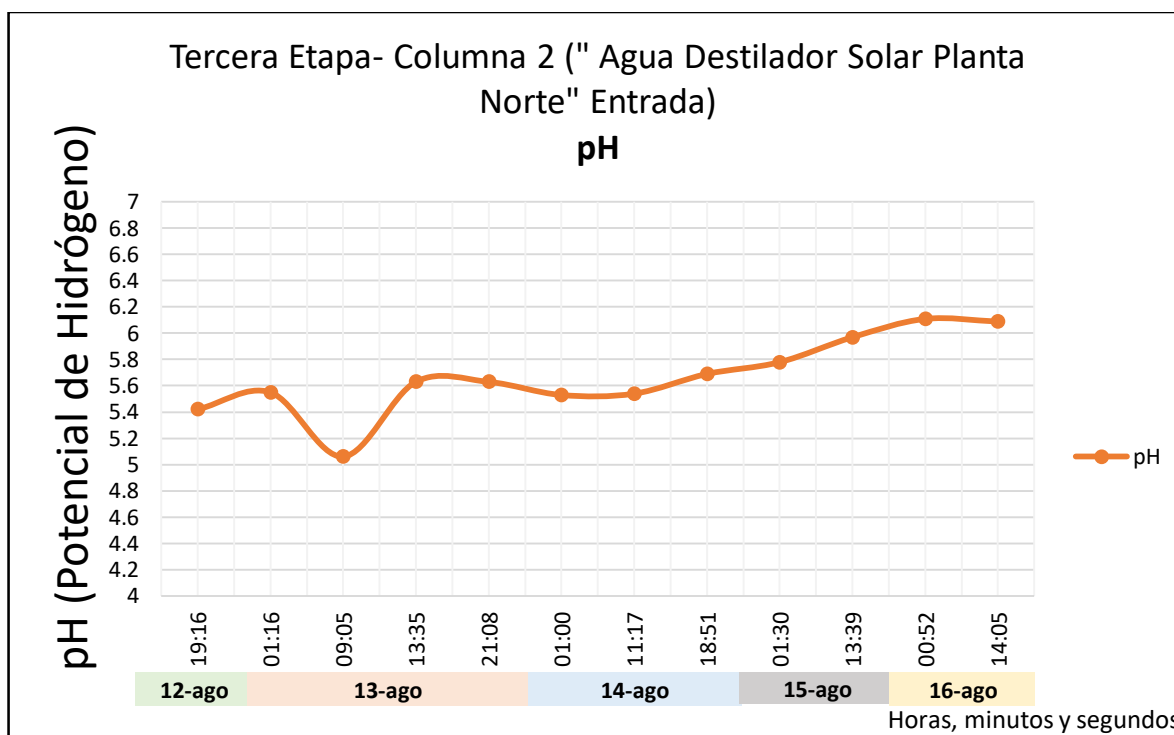


Figura 5-39 Resultados de pH, Entrada Columna 2, Etapa III.

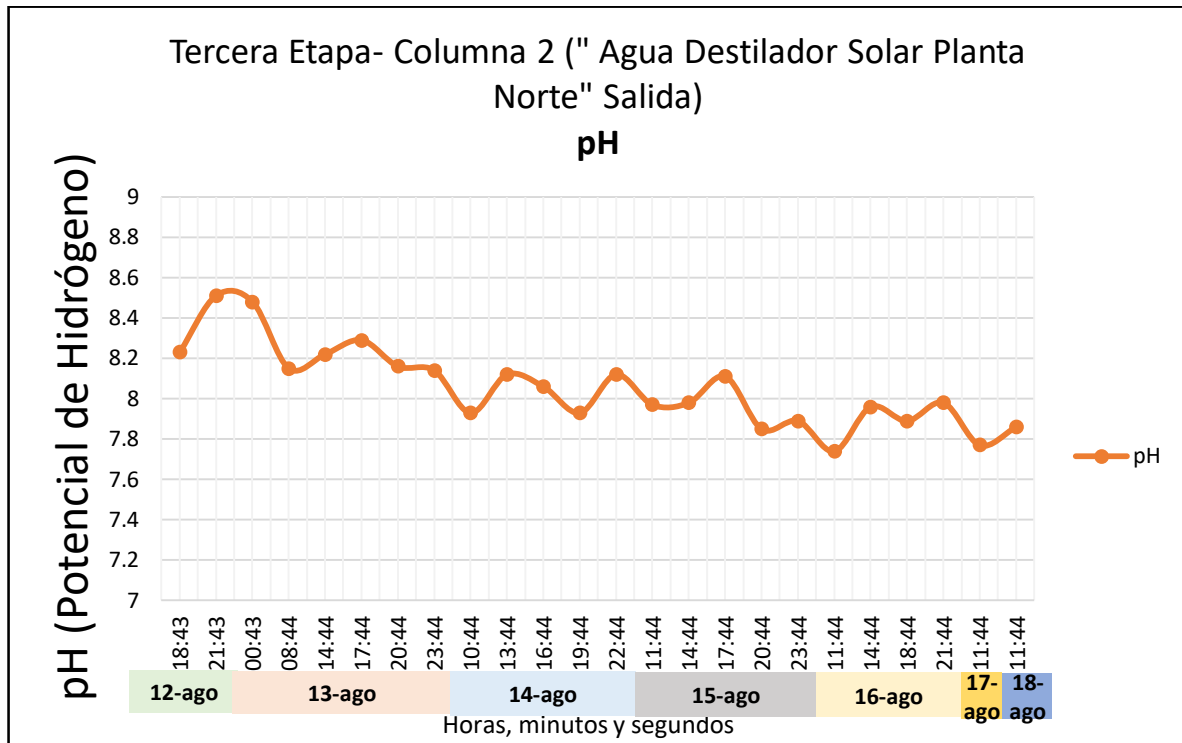


Figura 5-40 Resultados de pH, Salida Columna 2, Etapa III.

5.4.3.3 Alimentación con agua residual tratada de la Planta Norte (Columna 3)

5.4.3.3.1 Caudal de la Columna 3

En la etapa anterior el gasto de salida de la Columna 3 se estabilizó en 136 ml/hora. Al alimentar la columna con el agua residual tratada de la Planta Norte, se observó una disminución desde 129 ml/hora hasta 61.9 ml/hora y posteriormente volvió a aumentar. El descenso inicial observado en la velocidad de infiltración puede estar asociada con la colmatación debida a la presencia de materia orgánica suspendida, ocasionando que el flujo a través del material se volviera más lento. Los valores aquí descritos se muestran en la Figura 5-41.

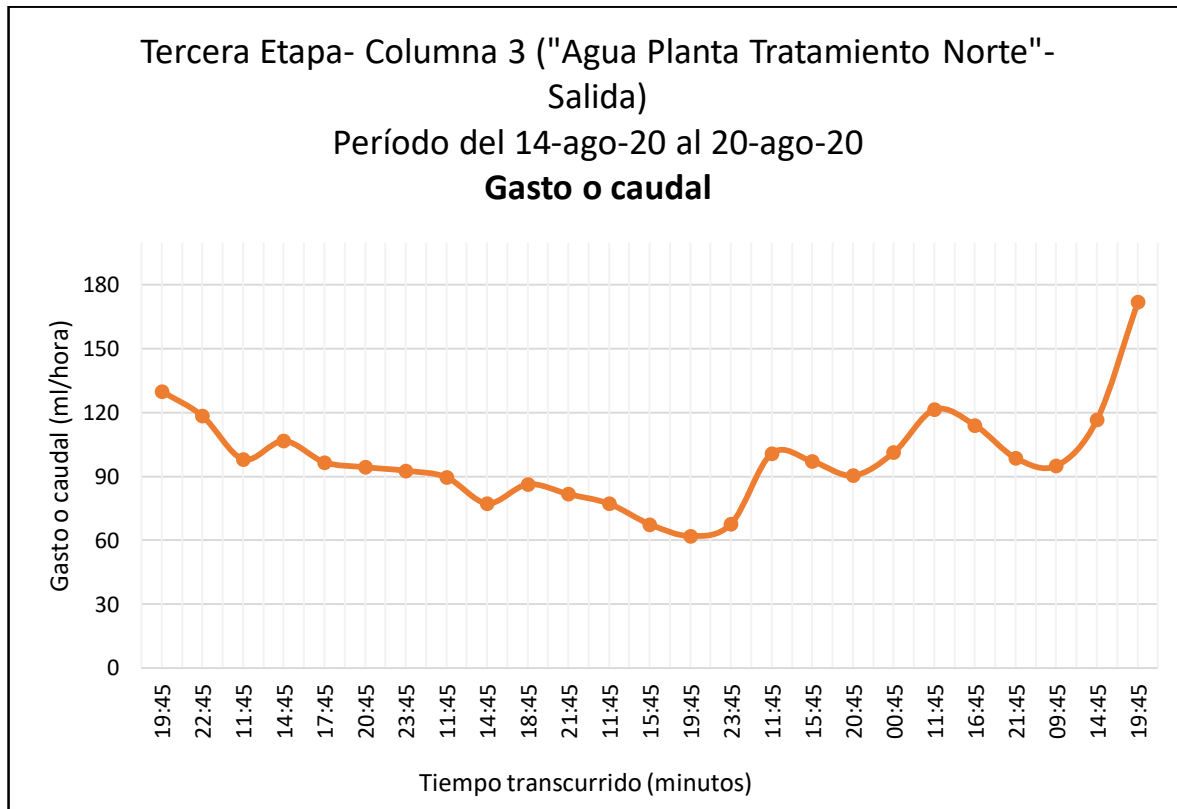


Figura 5-41 Caudal Agua Planta Tratamiento Norte, Columna 2, Etapa III.

5.4.3.3.2 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 3 (Entrada y Salida)

La Conductividad Eléctrica a la **Entrada** de la columna al ser alimentada por agua del efluente procedente de la Planta de Tratamiento Norte presentó variaciones mínimas entre 966 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 897 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 5-42). Por otra parte, los valores de **Salida** de Conductividad Eléctrica iniciaron en 116 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual lleva a suponer que se trataba del agua de lavado desmineralizada que estaba descendiendo por el medio y siendo desplazada por el efluente de la Planta Norte alimentado, hasta estabilizarse e igualarse en 897 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Lo dicho hasta aquí supone que de continuar más días con el experimento este valor iría en incremento y recibiría más aporte del material con el que estuvo en contacto, es decir, más sales disueltas. Los valores de Salida se muestran en la Figura 5-43.

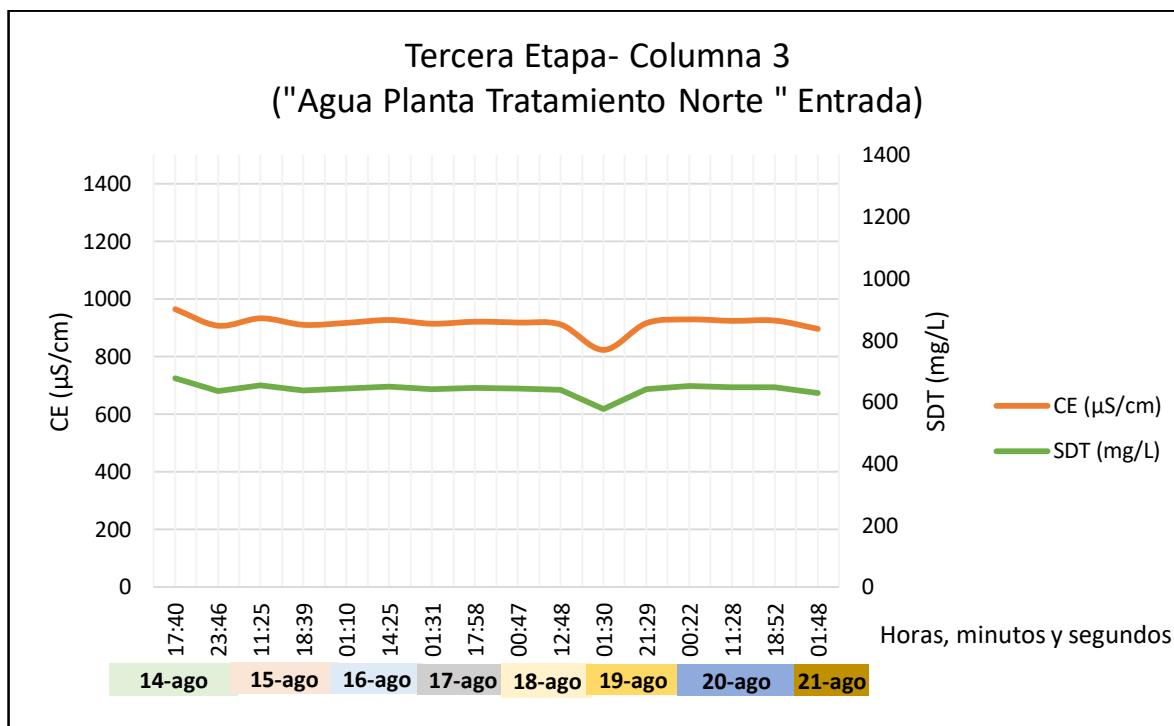


Figura 5-42 Resultados CE y SDT, Entrada Columna 3, Etapa III.

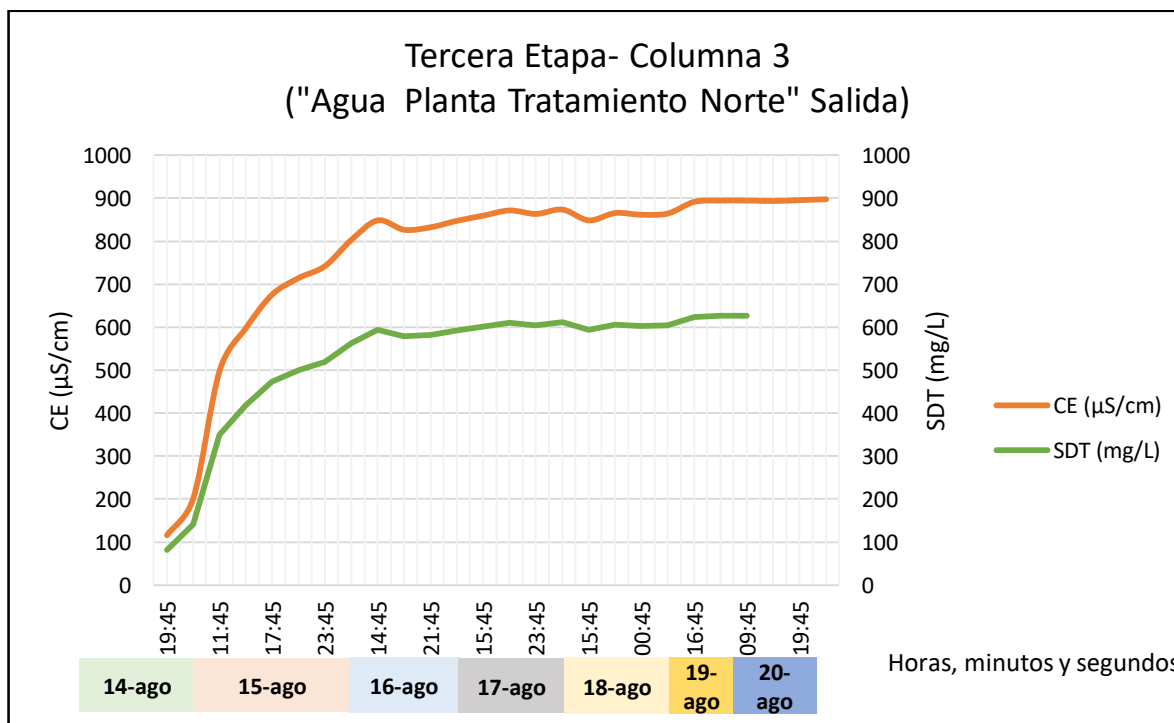


Figura 5-43 Resultados CE y SDT, Salida Columna 3, Etapa III.

5.4.3.3 Potencial de Hidrógeno (pH) en la Columna 3 (Entrada y Salida)

En la entrada de la columna 3 se observan valores de pH entre 7.45 y 7.55, lo cual no representa un incremento considerable en el agua de efluente de la Planta de Tratamiento Norte como se muestra en la Figura 5-44. Así mismo, el pH es una magnitud muy importante en la neutralización de desperdicios alimenticios, minería y una medida para el control de la contaminación, como es el caso de la neutralización de desechos industriales (Amaya, Cañón, y Avilés, 2004) que en este caso proceden del Complejo Industrial ubicado en la zona Norte de la Ciudad de Chihuahua.

Con respecto a la Salida de la Columna 3 se muestra una leve tendencia al descenso del pH desde 8.38 hasta finalmente concluir el experimento con un valor de 8. Lo anterior indica que el aumento de este parámetro con respecto al agua de alimentación proviene de la disolución de sales del medio por el que transitó el agua (Figura 5-45).

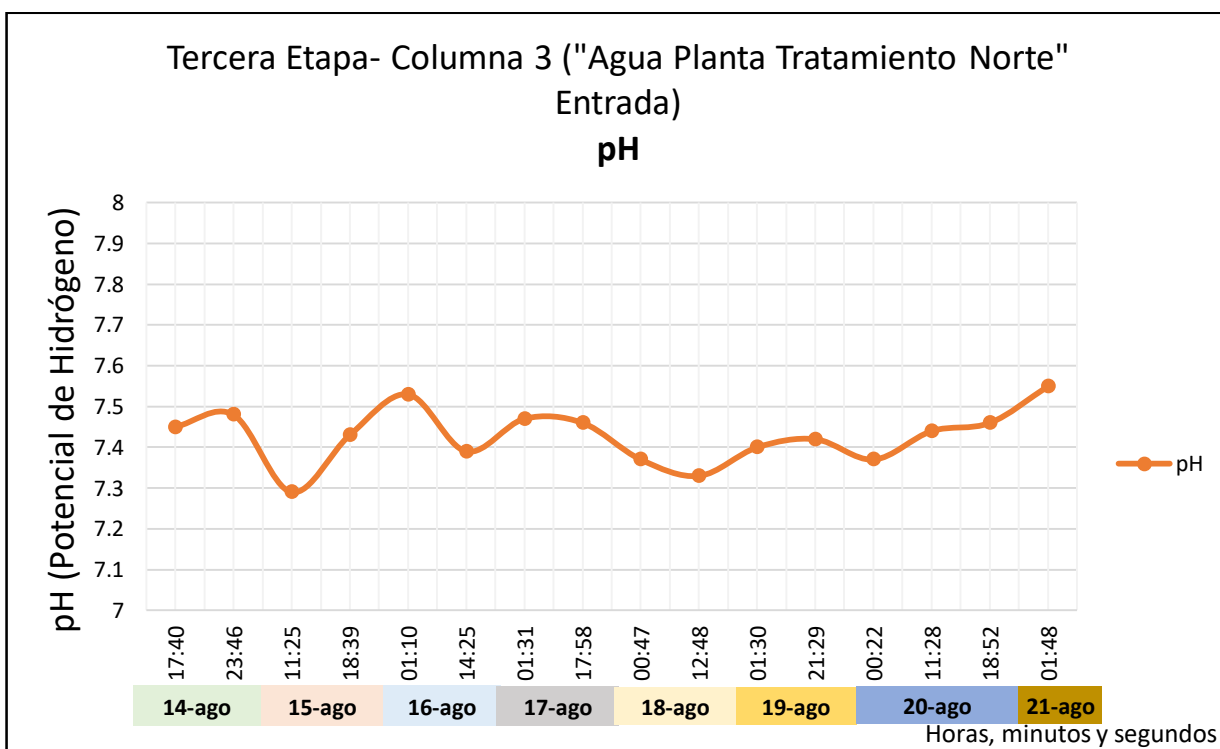


Figura 5-44 Resultados de pH, Entrada Columna 3, Etapa III.

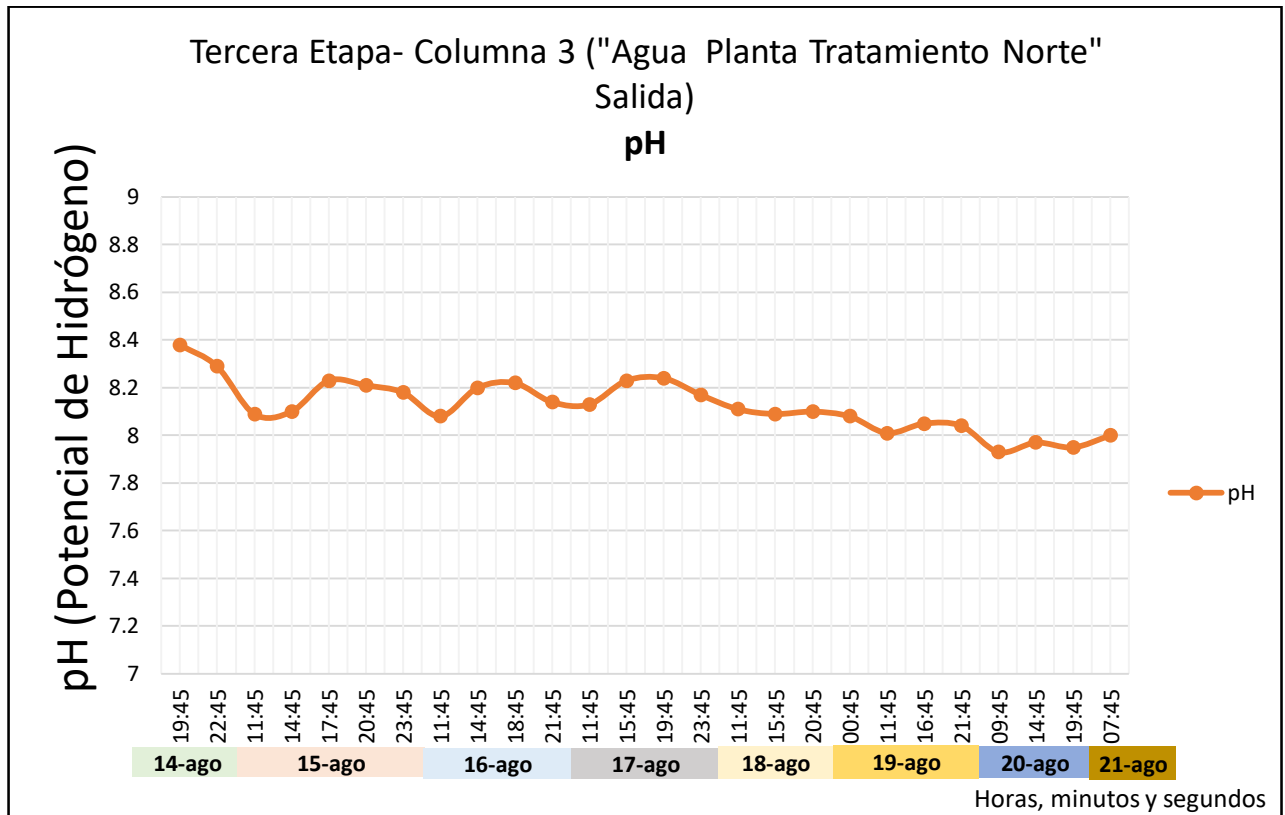


Figura 5-45 Resultados de pH, Salida Columna 3, Etapa III.

5.4.3.4 Alimentación con agua residual tratada de la Planta Sur (Columna 4)

5.4.3.4.1 Caudal de la Columna 4

En la etapa que antecede a la Etapa III, el sistema se estabilizó a un caudal de 79.99 ml/hora lo cual se consideraba bajo para la velocidad de infiltración deseada. Inicialmente, al alimentar la columna con el agua residual tratada de la Planta Sur, el caudal se mantuvo fluctuando alrededor de 90 ml/hora, logrando sólo al final de la prueba elevarse al valor deseado de 150 ml/hora como se observa en la Figura 5-46. Así mismo, al igual que en la Columna 3 alimentada con agua residual tratada de la Planta Norte, en esta columna la baja velocidad de infiltración puede estar relacionada con la presencia de la materia orgánica suspendida que ocasiona que el viaje a través del material se vuelva lento.

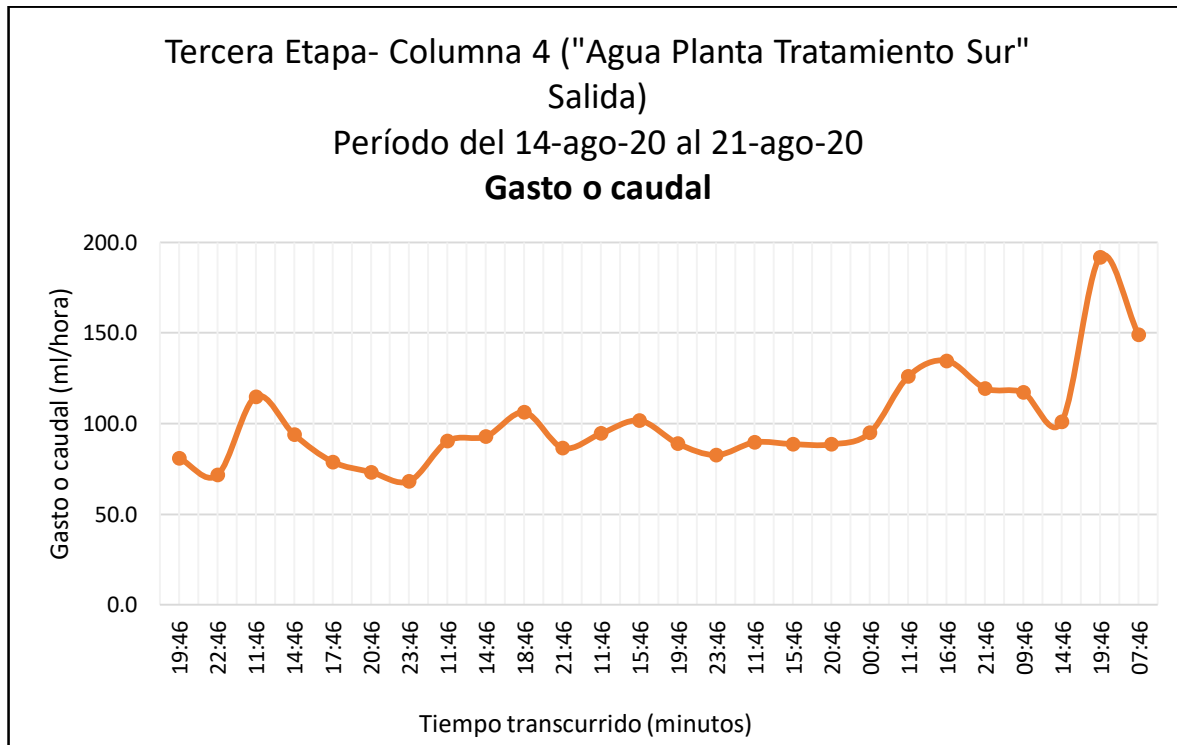


Figura 5-46 Caudal Agua Planta Tratamiento Sur, Columna 4, Etapa III.

5.4.3.4.2 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos totales de la Columna 4 (Entrada y Salida)

La Conductividad Eléctrica a la **Entrada** de la columna 4 al ser alimentada por agua del efluente procedente de la Planta de Tratamiento Sur mostró variaciones mínimas entre 934 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 902 $\mu\text{S}/\text{cm}$, como se muestra en la Figura 5-47.

A su vez, los valores de **Salida** de Conductividad Eléctrica iniciaron en 179 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual supone que es el agua destilada empleada en el lavado anterior que estaba descendiendo por el medio, hasta alcanzar los 879 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cosa parecida sucedió también con la Columna 3 (agua residual tratada de la Planta de Tratamiento Norte), hecho que induce a suponer que si se continua el experimento por más tiempo, el valor de Conductividad Eléctrica iría en incremento. El comportamiento en la Conductividad Eléctrica así como en los Sólidos Disueltos totales se observa en la Figura 5-48.

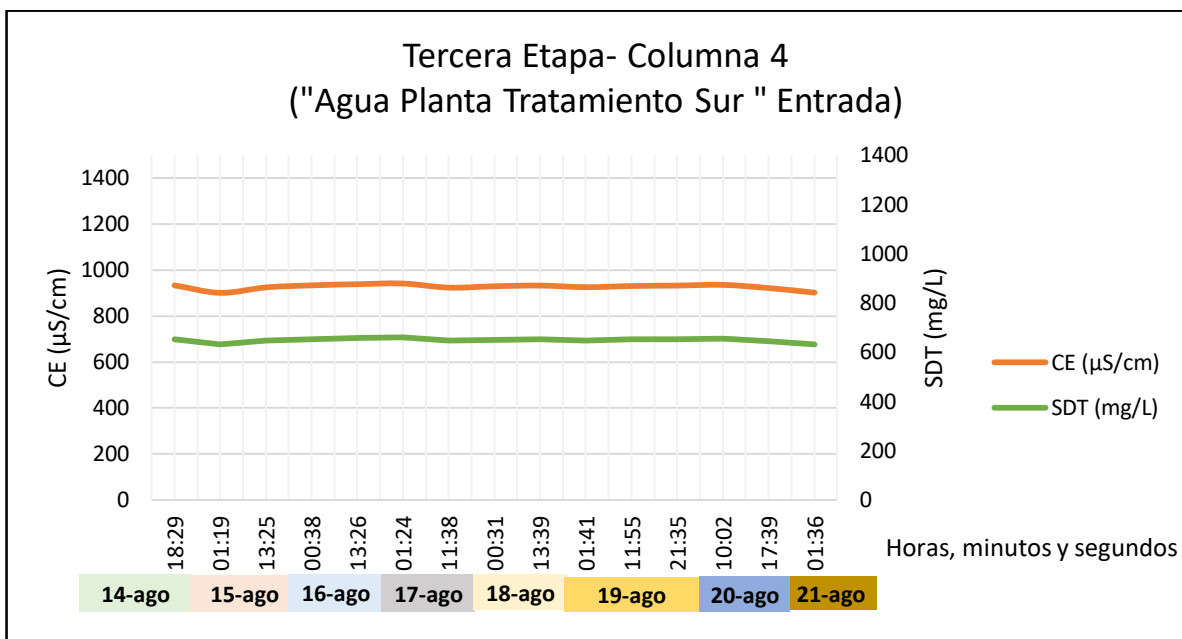


Figura 5-47 Resultados CE y SDT, Entrada Columna 4, Etapa III.

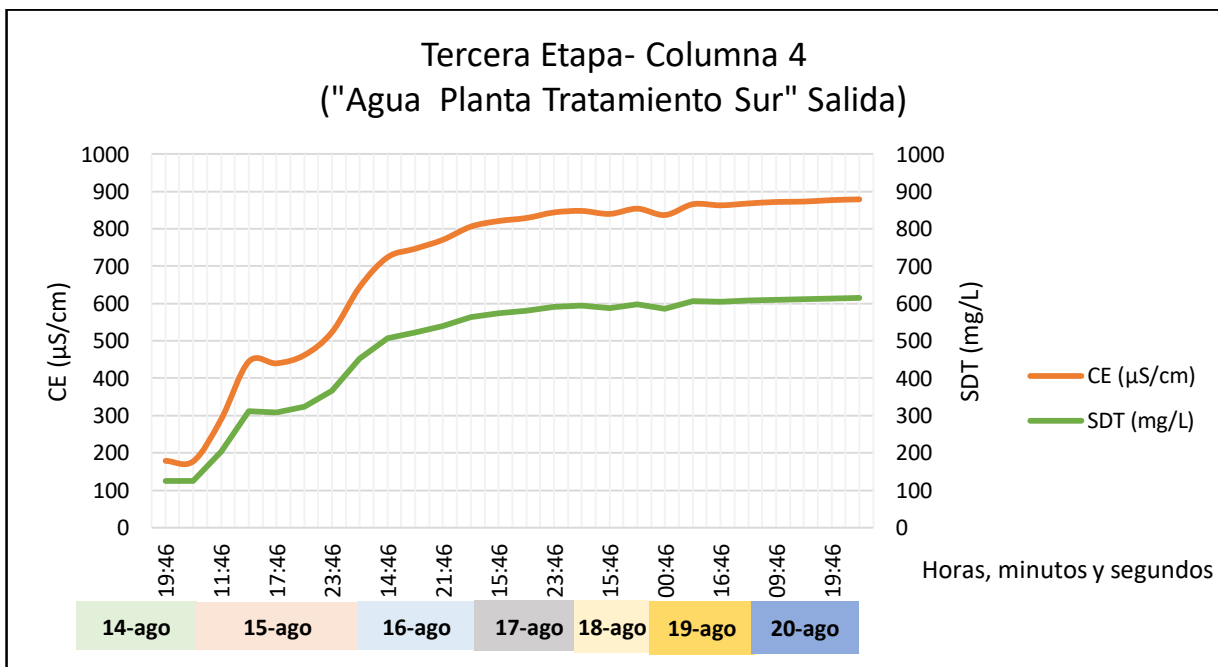


Figura 5-48 Resultados CE y SDT, Salida Columna 4, Etapa III.

5.4.3.4.3 Potencial de Hidrógeno (pH) de la Columna 4 (Entrada y Salida)

Por lo que respecta a los resultados de pH de la Columna 4 (Agua Residual Tratada de la Planta de Tratamiento Sur) se pueden visualizar valores en el agua de **Entrada** entre 7.43 y 7.46 lo cual muestra un comportamiento casi constante en este parámetro medido in situ. Estos valores se observan en la Figura 5-49. Su incremento a valores entre 8 y 8.4 en el parámetro medido de **Salida** está relacionado con la disolución de sales minerales. Dichos valores se observan en la Figura 5-50.

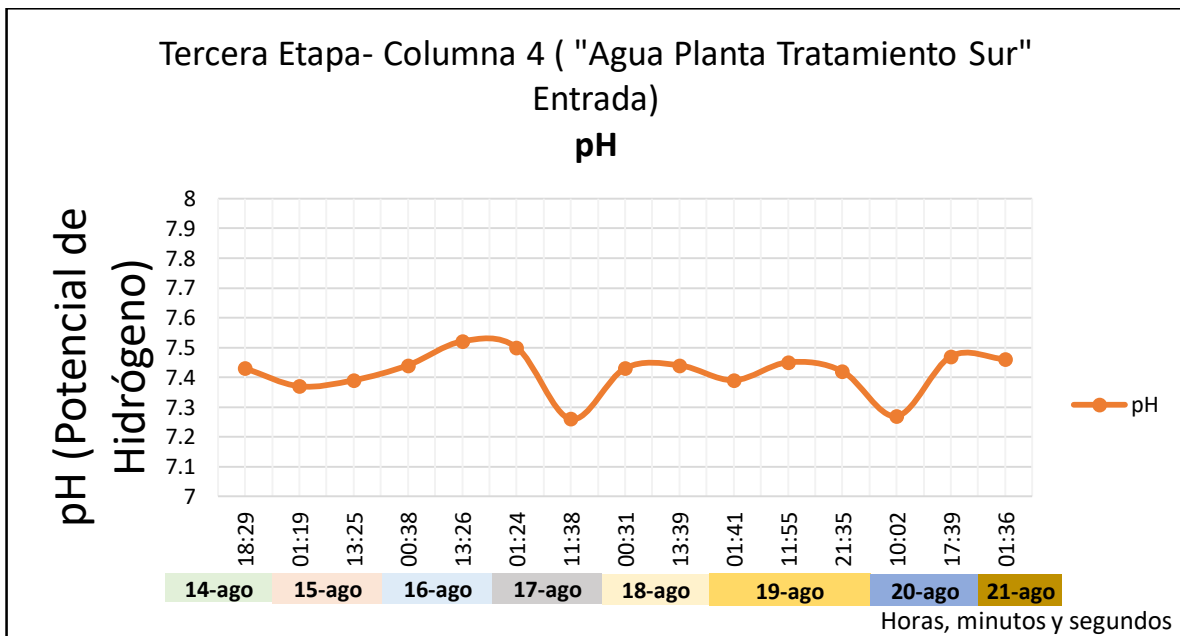


Figura 5-49 Resultados de pH, Entrada Columna 4, Etapa III.

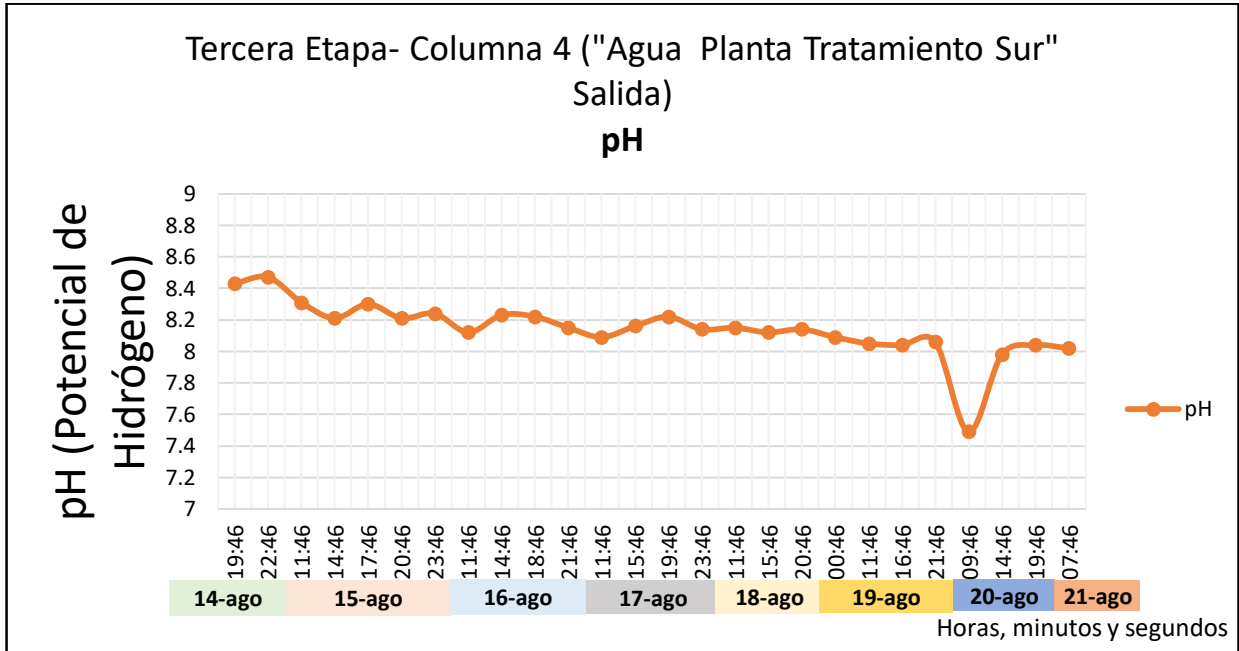


Figura 5-50 Resultados de pH, Salida Columna 4, Etapa III.

5.5 Análisis fisicoquímicos de muestras de agua en las cuatro columnas

Se elaboraron muestras compuestas con los efluentes finales colectados de cada una de las 4 columnas, en las cuales se midieron *in situ* los parámetros Conductividad Eléctrica, pH, Temperatura y Turbiedad.

Tanto las muestras compuestas de los efluentes como muestras representativas de los afluentes de las 4 columnas fueron enviadas para el análisis fisicoquímico y de metales a los laboratorios de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería, y al Servicio Geológico Mexicano, respectivamente.

En la Tabla 5-5 se pueden observar el conjunto de resultados de los parámetros fisicoquímicos, metales y datos obtenidos *in situ* por medio del equipo especializado. Se compararon los datos con los límites permisibles establecidos en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 y los niveles máximos permisibles de contaminantes no regulados por norma, en aguas residuales destinadas a la recarga artificial de acuíferos especificados en la NOM-014-CONAGUA-2003. Los parámetros referidos en esta última norma incluyen:



antimonio, berilio, boro, hierro, plata, selenio y uranio. En dicha Tabla general se señalaron en color rojo los valores cuyo límite permisible es excedido de acuerdo a las normas mencionadas.

En las Tablas 5-6, 5-7, 5-8 y 5-9 se presentan en forma independiente los resultados más relevantes de las pruebas de infiltración realizadas en las columnas 1, 2, 3 y 4, respectivamente, considerando los datos de entrada y de salida de cada una para un mejor análisis. Finalmente, se presenta una tabla comparativa (Tabla 5-10) con los datos de salida de las 4 columnas para evaluar por separado en cuales se obtienen mejores resultados.



Tabla 5-5 Resultados físicoquímicos de la Entrada y Salida de las Columnas 1, 2, 3 y 4.

	Muestra								Límite Máximo Permissible por la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994	Niveles máximos permisibles por la NOM-014-CONAGUA-2003
	Entrada a la columna				Salida de la columna					
Fecha:	07-feb-20		21-ago-20		21-ago-20					
Parámetros	Agua de lluvia (C1-E)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-E)	Agua Planta Tratamiento Norte (C3-E)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-E)	Agua de lluvia (C1-S)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-S)	Agua Planta Tratamiento Norte (C3-S)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-S)		
Color	-	0	25.00	15.00	10.00	10.00	25.00	34.00	20	20
Demanda Química de oxígeno (mg/l)	0	17.9	23.92	27.49	0	4.32	13.23	9.67	-	-
Nitratos (como N) (mg/l)	0.69	0.074	1,39	1,50	0,84	-	0,98	1,14	10.00	10.00
Nitritos(como N) (mg/l)	-	-	0.19	0.92	0.02	0.88	0.02	0.37	1.00	1.00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM) (mg/l)	-	0	0.3	0.14	0.45	1.55	0.19	0.19	0.50	0.50
Solidos Disueltos Totales (mg/l)	21.462	158	552	542.67	124.33	250.67	624	654.67	1000.00	1000.00
Dureza Total como CaCO3 (mg/l)	5.24	0.59	188.54	159.14	3.38	24.14	75.81	202	-	-
Dureza de Calcio como CaCO3 (mg/l)	5.24	0.00	167.37	138.38	0.00	12.98	35.33	157.94	-	-
Fluoruros (como F-) (mg/l)	0.07	ND	2.25	1.9	1.23	1.15	1.68	1.31	1.50	1.50
Cloruros (mg/l)	0.00	2.21	62.04	59.56	0	0	59.56	62.04	250.00	250.00
Sulfatos (mg/l)	1.33	1.51	95.36	88.32	0.8	0.8	90.56	92.48	400.00	400.00
Conductividad Eléctrica (µs/cm)	30.66	225	923	923	122	257	876	858	-	-



	Muestra								Límite Máximo Permisible por la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994	Niveles máximos permisibles por la NOM-014-CONAGUA-2003
	Entrada a la columna				Salida de la columna					
Fecha:	07-feb-20		21-ago-20		21-ago-20					
Parámetros	Agua de lluvia (C1-E)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-E)	Agua Planta Tratamie nto Norte (C3-E)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-E)	Agua de lluvia (C1-S)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-S)	Agua Planta Tratamie nto Norte (C3-S)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-S)		
Conductividad Eléctrica 2 (µs/cm ^A)	-	-	923	936	128	267	764	741	-	-
Potencial de Hidrogeno (pH) a 25°C	6.30	5.64	7.42	7.37	7.72	7.26	8.26	8.35	6.5-8.5	6.5-8.5
Turbiedad (UTN)	-	2.1	5.35	3.51	1.7	0.79	0.9	0.61	5	5
Temperatura (°C)	-	-	24.97	25.71	27.47	27.19	18.25	17.86	-	-
Plata (Ag) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	0.1
Aluminio (Al) (mg/L)	-	-	-	-	0,023	<0.001	<0.001	<0.001	0.2	0.2
Arsénico (As) (mg/L)	-	< 0.01	-	-	0.007	0.006	0.013	0.019	0.025	0.025
Boro (B) (mg/L)	-	-	-	-	0.066	0.088	0.158	0.161	-	0.3
Bario (Ba) (mg/L)	-	-	-	-	0.018	0.031	0.258	0.323	0.70	0.70
Berilio (Be) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	0.004
Bismuto (Bi) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-
Calcio (Ca) (mg/L)	2.100192	0.24	67.081896	55.462704	8.3	15.4	65.2	71.3	-	-



	Muestra								Límite Máximo Permisible por la Modificación a la NOM-127- SSA1-1994	Niveles máximos permisibles por la NOM-014- CONAGUA-2003
	Entrada a la columna				Salida de la columna					
Fecha:	07-feb-20		21-ago-20		21-ago-20					
Parámetros	Agua de lluvia (C1-E)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-E)	Agua Planta Tratamiento Norte (C3-E)	Agua Planta Tratami ento Sur (C4-E)	Agua de lluvia (C1-S)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-S)	Agua Planta Tratamient o Norte (C3-S)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-S)		
Cadmio (Cd) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.005	0.005
Cobalto (Co) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	0.002	0.001	-	-
Cromo (Cr) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.05	0.05
Cobre (Cu) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	2	2
Fierro (Fe) (mg/L)	0,023	< 0.1	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.30	0.30
Potasio (K) (mg/L)	-	-	-	-	4.22	9.05	22.15	19.03	-	-
Magnesio (Mg) (mg/L)	0	ND	5.12	5.02	1.36	3.24	13.13	15.27	-	-
Manganeso (Mn) (mg/L)	-	< 0.1	-	-	0.001	<0.001	0.199	0.157	0.15	0.15
Molibdeno (Mo) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	0.003	0.003	-	-
Sodio (Na) (mg/L)	0,00	2.32	-	-	17.1	31.2	113.3	113.7	200	200
Níquel (Ni) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	0.004	0.004	-	-
Fósforo (P) (mg/L)	-	ND	-	-	0.01	<0.01	3.04	1.76	-	-



	Muestra								Límite Máximo Permisible por la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994	Niveles máximos permisibles por la NOM-014-CONAGUA-2003
	Entrada a la columna				Salida de la columna					
Fecha:	07-feb-20		21-ago-20		21-ago-20					
Parámetros	Agua de lluvia (C1-E)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-E)	Agua Planta Tratamiento Norte (C3-E)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-E)	Agua de lluvia (C1-S)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-S)	Agua Planta Tratamien to Norte (C3-S)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-S)		
Plomo (Pb) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01	0.01
Antimonio (Sb) (mg/L)	-	-	-	-	0.001	0.006	0.004	0.001	-	0.006
Escandio (Sc) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-
Selenio (Se) (mg/L)	-	-	-	-	0.003	0.002	0.002	0.003	-	0.05
Estaño (Sn) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-
Estroncio (Sr) (mg/L)	-	-	-	-	0.108	0.264	1.028	1.343	-	-
Telurio (Te) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-
Titanio (Ti) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-
Talio (Tl) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-	-
Uranio (U) (mg/L)	-	-	-	-	0.001	<0.001	0.004	0.006	-	30
Vanadio (V) (mg/L)	-	-	-	-	0.047	0.031	0.008	0.027	-	-
Wolframio (W) (mg/L)	-	-	-	-	0.001	0.001	0.012	0.005	-	-
Zinc (Zn) (mg/L)	-	-	-	-	<0.001	<0.001	0.001	0.002	5.00	5.00



5.5.1 Calidad fisicoquímica del afluente y efluente de la Columna 1

En la Tabla 5-6 se puede observar el efecto de la lixiviación de la Columna 1, que fue alimentada con agua de lluvia para simular, de este modo, el impacto de la precipitación en la recarga natural. Con respecto a la Conductividad Eléctrica y los Sólidos Disueltos Totales se observó un aporte de sales al agua del material del acuífero de Tabalaopa-Aldama reflejado en incrementos de 91.34 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 102.87 mg/l, respectivamente.

El pH en el agua de alimentación se encuentra por debajo de la neutralidad, valor típico en el agua de lluvia, el cual aumentó debido al aporte de minerales a través de su paso por la columna.

Por lo que se refiere a los fluoruros, hay un incremento de 1.16 mg/l, lo que manifiesta la presencia geogénica de flúor en el material del acuífero Tabalaopa-Aldama, sin que haya alcanzado en este caso el valor límite establecido en la norma para consumo humano.

En lo que toca a los sulfatos, la diferencia de 0.53 no es significativa, al igual que tampoco excede los límites permisibles de la norma antes referida. En el caso del sodio existe un aporte de 17.10 mg/l por el material del acuífero sin exceder la NOM.

Tabla 5-6 Efecto de la lixiviación en la Columna 1.

Fecha:		07/02/2020	21/08/2020
Parámetro	Unidades	Agua de lluvia (C1-E)	Agua de lluvia (C1-S)
Temperatura	°C	-	27.47
Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C	-	6.30	7.72
Color	Pt-Co	-	10.00
Turbiedad	UNT	-	1.7
Conductividad Eléctrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	30.66	122
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	21.46	124.33
Fluoruros	mg/l	0.07	1.23
Cloruros	mg/l	0.00	0
Sulfatos	mg/l	1.33	0.8
Nitratos (como N)	mg/l	0.69	0.84
Nitritos (como N)	mg/l	-	0.02
Dureza Total como CaCO_3	mg/l	5.24	3.38
Dureza de Calcio como CaCO_3	mg/l	5.24	0.00
Fierro (Fe)	mg/l	0.023	<0.001
Calcio (Ca)	mg/l	2.10	8.3*
Magnesio (Mg)	mg/l	0	1.36
Sodio (Na)	mg/l	0	17.1
Potasio (K)	mg/l	-	4.22
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/l	-	0.45
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	0	0



5.5.2 Calidad fisicoquímica del afluente y efluente de la Columna 2

En la Tabla 5-7 se puede observar el efecto de la lixiviación de la Columna 2, misma que fue alimentada con agua procedente del tratamiento en la Planta Norte y que posteriormente fue sometida a un proceso de destilación solar.

Con respecto a la Conductividad Eléctrica y los Sólidos Disueltos Totales se observó un aporte de sales al agua del material del acuífero de Tabalaopa-Aldama reflejado en aumentos de 32 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 92.67 mg/l, respectivamente. A su vez, el color muestra un incremento de 10 unidades de color verdadero en la escala de Platino-Cobalto, pero no rebasa las 20 unidades que establece la NOM para recarga. Respecto a la turbiedad, se observa un disminución de 1.31 UNT.

Por lo que se refiere a los fluoruros, hay un incremento de 1.15 mg/l, similar al observado en la columna 1, y que de nuevo representa la presencia geogénica de flúor en el material del acuífero Tabalaopa-Aldama, sin que haya alcanzado en este caso el valor límite de 1.5 mg/l establecido en la norma para consumo humano. En lo que respecta a los cloruros, hay una disminución de 2.21 mg/l al estar en contacto con el material, eliminándolo a totalidad.

A su paso por el suelo de la columna el agua recibió aportes en la Dureza Total, Dureza de Calcio, magnesio y potasio. El pH, originalmente bajo debido al proceso previo de destilación, se incrementó hasta un valor aceptable por la normatividad para agua de consumo, gracias a la incorporación de algunas sales durante su paso por la columna. La demanda química de oxígeno presenta una disminución muy significativa de 13.58 mg/l, dando como resultado una mínima cantidad de materia orgánica que no fue removida por el material.



Tabla 5-7 Efecto de la lixiviación de la Columna 2.

Fecha:		27/12/2018	21/08/2020
Parámetro	Unidades	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-E)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-S)
Temperatura	°C	-	27.19
Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C	-	5.64	7.26
Color	Pt-Co	0	10.00
Turbiedad	UNT	2.1	0.79
Conductividad Eléctrica	µs/cm	225	257
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	158	250.67
Fluoruros	mg/l	ND	1.15
Cloruros	mg/l	2.21	0
Sulfatos	mg/l	1.51	0.8
Nitratos (como N)	mg/l	0.074	-
Nitritos (como N)	mg/l	-	0.88
Dureza Total como CaCO ₃	mg/l	0.59	24.14
Dureza de Calcio como CaCO ₃	mg/l	0.00	12.98
Hierro (Fe)	mg/l	< 0.1	<0.001
Calcio (Ca)	mg/l	0.24	15.4
Magnesio (Mg)	mg/l	ND	3.24
Sodio (Na)	mg/l	2.32	31.2
Potasio (K)	mg/l	-	9.05
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/l	0	1.55
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	17.9	4.32
Manganeso (Mn)	mg/l	< 0.1	<0.001
Arsénico (As)	mg/l	< 0.01	0.006
Fósforo (P)	mg/l	ND	<0.01

5.5.3 Calidad fisicoquímica del afluente y efluente de la Columna 3

En la Tabla 5-8 se puede observar el efecto de la lixiviación de la Columna 3, la cual fue alimentada con agua residual tratada procedente de la Planta Norte de la ciudad de Chihuahua.

Se observa que el color presenta el mismo valor de 25 unidades de color verdadero en escala Pt-Co tanto a la entrada como a la salida de la columna, el cual se encuentra por encima de la norma que establece un límite máximo permisible de 20. Este resultado se encuentra íntimamente relacionado con la concentración de manganeso (0.199 mg/l)



observada en la Tabla 5-5 para el agua de salida de la Columna 3, que excede el límite permisible de 0.15 mg/l en este parámetro. Dicho mineral disuelto le proporciona el color al agua cuando se encuentra oxidado.

Por lo que se refiere a la turbiedad, hay una disminución de 4.45 UNT, lo cual es muy significativo ya que a la entrada de la columna superaba el Límite Permisible de 5 unidades nefelométricas de turbiedad. Sin embargo, en su paso por la columna se logró la disminución de este valor dando como resultado menos de 1 UNT en el agua de salida.

Un resultado muy importante de esta fase experimental fue lo ocurrido con los Sólidos Disueltos Totales, mismos que se incrementaron de 552 mg/l a 624 mg/l. Dicho aumento es evidencia de un deterioro de la calidad del agua infiltrada a causa del aporte natural de minerales como consecuencia de la disolución por contacto con el agua. Se deduce que el incremento en salinidad pudo haber resultado más notable de haberse continuado con el experimento de infiltración, ya que la prueba realizada tuvo una duración de tan sólo 7 días. En la Figura 5-43 se aprecia la tendencia a continuar con el incremento en SDT con el transcurso del tiempo.

En lo que respecta a la Conductividad Eléctrica, aunque el valor registrado en la Tabla 5-8 aparentemente presentó una disminución, la tendencia observada en la misma Figura 5-43 indica haber alcanzado exactamente el mismo valor del agua de entrada, con la posibilidad de seguir incrementándose a causa de lo antes expuesto.

Los fluoruros muestran un decremento de 0.57 mg/l, aunque en ambos casos, tanto a la entrada como a la salida de la columna muestran un valor superior al permitido por la NOM.

Los sulfatos, dureza total, dureza de calcio y la demanda química de oxígeno presentan una disminución al estar en contacto con el material de la columna 3. En el caso de la DQO el descenso logrado no es más significativo que el observado en la columna 2.

Por lo que se refiere al magnesio presenta un incremento de 8.01 mg/l.

Para finalizar con el análisis de la columna 3, el pH muestra un incremento de 0.84; tanto a la entrada como a la salida se encuentran dentro de los límites establecidos por la NOM.



Tabla 5-8 Efecto de la lixiviación Columna 3

Fecha:		07-feb	21-ago
Parámetro	Unidades	Agua Planta Tratamiento Norte (C3-E)	Agua Planta Tratamiento Norte (C3-S)
Temperatura	°C	24.97	18.25
Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C	-	7.42	8.26
Color	Pt-Co	25.00	25.00
Turbiedad	UNT	5.35	0.9
Conductividad Eléctrica	µs/cm	923	876
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	552	624
Fluoruros	mg/l	2.25	1.68
Cloruros	mg/l	62.04	59.56
Sulfatos	mg/l	95.36	90.56
Nitratos (como N)	mg/l	1.39	0.98
Nitritos (como N)	mg/l	0.19	0.02
Dureza Total como CaCO ₃	mg/l	188.54	75.81
Dureza de Calcio como CaCO ₃	mg/l	167.37	35.33
Fierro (Fe)	mg/l	-	<0.001
Calcio (Ca)	mg/l	67.08	65.2
Magnesio (Mg)	mg/l	5.12	13.13
Sodio (Na)	mg/l	-	113.3
Potasio (K)	mg/l	-	22.15
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/l	0.3	0.19
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	23.92	13.23

5.5.4 Calidad fisicoquímica del afluente y efluente de la Columna 4

En la Tabla 5-9 se puede observar el efecto de la lixiviación de la Columna 4, que fue alimentada con agua residual tratada procedente de la Planta Sur de la ciudad de Chihuahua.

Por lo que se refiere a la turbiedad, no obstante que en el agua de entrada presentaba un valor bajo (3.51 UNT), a su paso a través del medio este parámetro disminuyó hasta un valor apenas perceptible (0.61 UNT).

El color a la salida muestra un valor superior al límite de las normas para agua potable y para recarga, debido al incremento de 19 unidades en la escala Pt-Co con respecto al valor de la entrada. Esto puede estar asociado al manganeso presente en el agua de salida en una concentración de 0.157 mg/l, que supera ligeramente el límite de 0.15 mg/l que señala la NOM para agua potable.



Los Sólidos Disueltos Totales medidos en laboratorio indican un incremento de 112 mg/l con relación al agua de entrada lo que, al igual que ocurre en la Columna 3, evidencia el deterioro de la calidad del agua infiltrada a causa del aporte natural de minerales como consecuencia de la disolución por contacto con el medio. En este caso también se deduce que el incremento en salinidad pudo haber sido más notable de haberse continuado con el experimento de infiltración. En la Figura 5-48 se aprecia la tendencia a continuar con el incremento en SDT con el transcurso del tiempo.

En el caso de la Conductividad Eléctrica, aunque en el análisis de las muestras compuestas presentó una disminución, la tendencia de este parámetro en el agua de salida de la columna 4 también es a seguir incrementándose con el tiempo (Figura 5-48).

Los fluoruros en el agua de salida muestran un decremento de 0.59 mg/l con respecto a la entrada a la columna 4, logrando así el cumplimiento de este parámetro con el valor permitido por la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994.

La dureza total y la dureza de calcio, presentaron una ligera elevación en el agua de salida, lo que se refleja en incrementos en las concentraciones del calcio y el magnesio.

Finalmente, la demanda química de oxígeno presenta una disminución de 17.82 mg/l durante el paso del agua a través del material de la columna 4.

Tabla 5-9 Efecto de la lixiviación Columna 4.

Fecha:		07-feb	21-ago
Parámetro	Unidades	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-E)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-S)
Temperatura	°C	25.71	17.86
Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C	-	7.37	8.35
Color	Pt-Co	15.00	34.00
Turbiedad	UNT	3.51	0.61
Conductividad Eléctrica	µs/cm	923	858
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	542.67	654.67
Fluoruros	mg/l	1.9	1.31
Cloruros	mg/l	59.56	62.04
Sulfatos	mg/l	88.32	92.48



Fecha:		07-feb	21-ago
Parámetro	Unidades	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-E)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-S)
Nitratos (como N)	mg/l	1.5	1,14
Nitritos (como N)	mg/l	0.92	0.37
Dureza Total como CaCO ₃	mg/l	159.14	202
Dureza de Calcio como CaCO ₃	mg/l	138.38	157.94
Hierro (Fe)	mg/l	-	<0.001
Calcio (Ca)	mg/l	55.46	71.3
Magnesio (Mg)	mg/l	5.02	15.27
Sodio (Na)	mg/l	-	113.7
Potasio (K)	mg/l	-	19.03
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/l	0.14	0.19
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	27.49	9.67

5.6 Comparación en los Resultados de las cuatro salidas de las Columnas 1, 2, 3 y 4

En la Tabla 5-10 se muestra una comparación de las características cualitativas del agua de salida en las cuatro columnas.

Los valores aquí mostrados señalan que los efluentes de las plantas Norte y Sur presentan una mayor concentración de color que el estipulado en la norma para recarga. Por lo que se refiere al efluente de la columna 3, la concentración de flúor supera ligeramente al límite, lo que se relaciona con el material del acuífero que aporta fluoruros al agua mediante disolución.

Por otro lado, aunque la salinidad en términos de Sólidos Disueltos Totales a la salida de las 4 columnas se encuentra por debajo del LMP de la norma, los efluentes correspondientes a las dos plantas de tratamiento presentan concentraciones muy superiores en este parámetro. De igual modo se observa que las concentraciones de calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros y sulfatos en las columnas 3 y 4 son las mayores de las cuatro columnas. También en ellas se pueden observar mayores concentraciones arsénico, boro, bario, molibdeno, níquel, fósforo, estroncio, uranio y manganeso. Hay que mencionar además que el lixiviado del agua de las plantas Norte y Sur supera el LMP éste último elemento.



Tabla 5-10 Comparación de las Salidas de las Columnas 1,2 ,3 y 4

Fecha:		21-ago	21-ago	21-ago	21-ago	Niveles máximos permisibles por la NOM-014-CONAGUA-2003
Parámetros	Unidades	Agua de lluvia (C1-S)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-S)	Agua Planta Tratamiento Norte (C3-S)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-S)	
Temperatura	°C	27.47	27.19	18.25	17.86	-
Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C	-	7.72	7.26	8.26	8.35	6.5-8.5
Color	Pt-Co	10.00	10.00	25.00	34.00	20
Turbiedad	UNT	1.7	0.79	0.9	0.61	5
Conductividad Eléctrica	µs/cm	122	257	876	858	-
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	124.33	250.67	624	654.67	1000.00
Fluoruros	mg/l	1.23	1.15	1.68	1.31	1.50
Cloruros	mg/l	0	0	59.56	62.04	250.00
Sulfatos	mg/l	0.8	0.8	90.56	92.48	400.00
Nitratos (como N)	mg/l	0.84	-	0.98	1.14	10.00
Nitritos (como N)	mg/l	0.02	0.88	0.02	0.37	1.00
Dureza Total como CaCO ₃	mg/l	3.38	24.14	75.81	202	500.00
Dureza de Calcio como CaCO ₃	mg/l	0.00	12.98	35.33	157.94	-
Fierro (Fe)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.30
Calcio (Ca)	mg/l	8.3	15.4	65.2	71.3	-
Magnesio (Mg)	mg/l	1.36	3.24	13.13	15.27	-
Sodio (Na)	mg/l	17.1	31.2	113.3	113.7	200.00
Potasio (K)	mg/l	4.22	9.05	22.15	19.03	-
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/l	0.45	1.55	0.19	0.19	0.50
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	0	4.32	13.23	9.67	-
Plata (Ag)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.1
Aluminio (Al)	mg/l	0,023	<0.001	<0.001	<0.001	0.20
Arsénico (As)	mg/l	0.007	0.006	0.013	0.019	0.025
Boro (B)	mg/l	0.066	0.088	0.158	0.161	0.3



Fecha:		21-ago	21-ago	21-ago	21-ago	Niveles máximos permisibles por la NOM-014-CONAGUA-2003
Parámetros	Unidades	Agua de lluvia (C1-S)	Agua Destilador Solar Planta Norte (C2-S)	Agua Planta Tratamiento Norte (C3-S)	Agua Planta Tratamiento Sur (C4-S)	
Bario (Ba)	mg/l	0.018	0.031	0.258	0.323	0.7
Berilio (Be)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.004
Bismuto (Bi)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-
Cadmio (Cd)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.005
Cobalto (Co)	mg/l	<0.001	<0.001	0.002	0.001	-
Cromo (Cr)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.05
Cobre (Cu)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	2
Manganeso (Mn)	mg/l	0.001	<0.001	0.199	0.157	0.15
Molibdeno (Mo)	mg/l	<0.001	<0.001	0.003	0.003	-
Níquel (Ni)	mg/l	<0.001	<0.001	0.004	0.004	-
Fósforo (P)	mg/l	0.01	<0.01	3.04	1.76	-
Plomo (Pb)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
Antimonio (Sb)	mg/l	0.001	0.006	0.004	0.001	0.006
Escandio (Sc)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-
Selenio (Se)	mg/l	0.003	0.002	0.002	0.003	0.05
Estaño (Sn)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-
Estroncio (Sr)	mg/l	0.108	0.264	1.028	1.343	-
Telurio (Te)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-
Titanio (Ti)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-
Talio (Tl)	mg/l	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-
Uranio (U)	mg/l	0.001	<0.001	0.004	0.006	30
Vanadio (V)	mg/l	0.047	0.031	0.008	0.027	-
Wolframio (W)	mg/l	0.001	0.001	0.012	0.005	-
Zinc (Zn)	mg/l	<0.001	<0.001	0.001	0.002	5.00



Capítulo 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Todo lo anterior expuesto permitió comprobar la hipótesis planteada al comienzo de la investigación, tomando como base los objetivos generales y específicos planteados para poder llegar a las siguientes conclusiones:

1. Ubicar un punto cercano a la Ciudad de Chihuahua dentro del Acuífero Tabalaopa-Aldama permitió coleccionar una muestra de suelo para realizar las pruebas de recarga. La caracterización del material reveló que cuenta con las condiciones más favorables para la infiltración del agua en cuanto a su granulometría, peso específico, permeabilidad y porosidad. Estas características indican gran capacidad para el almacenamiento de agua y una velocidad de infiltración alta debido a que el material corresponde a gravas y arenas con una cantidad muy pequeña de finos.
2. Construir un modelo a pequeña escala en 5 columnas empacadas con el suelo de manera similar permitió reproducir la situación en la zona no saturada bajo condiciones naturales. Se observó la infiltración del agua mediante la regulación del caudal a la velocidad a la cual viaja el agua a través de un material con una mezcla de grava y arena, que desciende por gravedad, con un monitoreo constante de 24 horas.
3. El empleo de diferentes tipos de agua en los estudios de recarga indicó de manera general que a su paso por el material de infiltración, se reduce la turbiedad original mediante la disminución de los sólidos suspendidos presentes en el agua de la alimentación. El pH se incrementa en todos los casos, mejorando de este modo las características del afluente, particularmente al tratarse de agua de lluvia y el destilado resultante del proceso al que se sometió previamente el efluente de la Planta Norte.



4. En todas las pruebas realizada se observa disminución en el contenido de materia orgánica expresada como Demanda Química de Oxígeno, siendo el resultado más favorable el obtenido en la columna alimentada con el agua procedente de la Planta Norte después de haber pasado por el sistema de destilación solar.
5. Los efluentes procedentes de las Plantas de Tratamiento Norte y Sur se comportaron de manera muy parecida, presentando las mayores concentraciones en la salida de las 4 columnas en cuanto a la salinidad en términos de Sólidos Disueltos Totales. Esto sugiere que, con el tiempo, puedan representar un riesgo de salinización al acuífero si se recarga con esta agua. Lo anterior queda de manifiesto además por las concentraciones de calcio, magnesio, sodio, cloruros y sulfatos, que también son las más altas de las cuatro columnas. Así mismo, en ambos casos se observan valores mayores en las concentraciones de arsénico, boro, bario, manganeso, molibdeno, níquel, fósforo, estroncio y uranio.
6. Referente a los Límites Máximos Permisibles referidos en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 y en la NOM-014-CONAGUA-2003, los efluentes de las Plantas de Tratamiento Norte y Sur presentan mayor concentración de color y manganeso, ya que ambos están relacionados debido a la formación de precipitados de éste último al ser oxidado. Respecto a la Planta de Tratamiento Norte el efluente supera ligeramente el límite de Flúor, lo cual tiene relación con el material del acuífero que aporta fluoruros al agua mediante disolución.
7. Las pruebas de recarga realizadas con agua tratada sometida al proceso de destilación solar demuestran que, aún cuando reciben un aporte de aproximadamente 100 mg/l en términos de sólidos disueltos totales, el resultado final corresponde a un agua de buena calidad ($SDT < 300 \text{ mg/l}$), cuyos parámetros fisicoquímicos y metales analizados cumplen con la normatividad para recarga artificial efectuada con agua tratada.



8. Con los experimentos realizados en columnas con diferentes tipos de agua queda demostrado que emplear agua procedente de un efluente terciario de un proceso de destilación solar genera mejores resultados que los efluentes secundarios de las plantas de tratamiento de aguas residuales en los procesos de recarga inducida al agua subterránea.
9. Se debe evaluar la calidad del agua antes de realizar obras de recarga al acuífero con aguas residuales tratadas ya que esto representa un riesgo de contaminación al mismo, por lo que se deben buscar alternativas como el uso de un tratamiento terciario similar al proceso de destilación solar para garantizar que el agua empleada en la recarga no represente riesgos a la salud pública.
10. Queda demostrado que, emplear agua procedente de un efluente terciario de un proceso de destilación solar, genera mejores resultados que los efluentes secundarios de las plantas de tratamiento de aguas residuales, en los procesos de recarga inducida al agua subterránea, dicha conclusión se obtuvo al realizar los experimentos en 5 columnas con diferentes tipos de agua.

Recomendaciones:

1. Emplear mayor tiempo de experimentación en estudios similares realizados en las columnas con agua procedente de los efluentes de las plantas de tratamiento, a fin de asegurar la no variabilidad de las condiciones finales alcanzadas.
2. Hacer adecuaciones al modelo construido, tales como utilización de sistemas de alimentación continua a las columnas de mayor volumen que permitan que ésta sea suficiente para un periodo de tiempo más largo.



3. Realizar estudios similares empleando columnas con diferentes dimensiones, especialmente con mayor profundidad, para que esté mejor representada la zona no saturada en función de su espesor.
4. Se sugiere implementar un sistema de monitoreo continuo para evaluar el agua de recarga al acuífero.



Bibliografía

- Alarcón-Herrera, Bundschuh, Nath, H.B, N., Gutiérrez, Reyes-Gómez, . . . Sracek. (2012). Co-occurrence of Arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *Journal of Hazardous Materials*.
- Alexson, J. (2013). Artificial groundwater recharge - is it possible in Mozambique? Dissertations in Geology at Lund University. (369), 22.
- Amaya, W. F., Cañon, Ó. A., & Avilés, Ó. F. (2004). Control de pH para Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*(14), 86-95.
- Andelman, Bauwer, Charbeneau, Christman, Crook, Fan, . . . Vecchioli. (1994). Ground water recharge using waters of impaired quality. Washington: National Academy Press.
- Anderson, J. (2003). The environmental benefits of water recycling and reuse. *Water Supply*, 3(4), 1-10.
- Asano, T., & Cotruvo, J. A. (2004). Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations. *Water Research*, 38(8), 1941-1951.
- Barros, V. (2005). *El Cambio Climático Global*. Buenos Aires, Argentina: Libros del Zorzal.
- Bonneau, M., & Levy, G. (1979). *Ensamblaje y organización física de partículas*. Paris : Elsevier-Masson.
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10(2).
- Bridges, L. W. (1970). Paleozoic history of the southern Chihuahua tectonic belt. *Field Trip of the Symposium West Texas Geological Society*, 64, págs. 67-74. México.
- Bruckler, L. (1998). *Interfaz Frágil del suelo*. Paris: Ediciones del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas .
- Buol, S., Hole, F., & McCracken, R. J. (1983). *Génesis y clasificación de suelos*. México: Trillas.
- Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, 13, 121-136.
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. (s.f.). *Características de las Aguas Residuales*. Salamanca.
- CNA. (2010). *Comisión Nacional del Agua*. Obtenido de www.gob.mx/conagua
- CNA. (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tabalaopa-Aldama (0835), Estado de Chihuahua*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- CONABIO. (2014). *La biodiversidad en Chihuahua: Estudio de Estado*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) , 2014.
- CONABIO. (2017). *La biodiversidad en Durango. Estudio de Estado*. México: México : Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) : Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente de Durango.
- CONAGUA. (2003). NOM-014-CONAGUA-2003. *Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*. México.
- CONAGUA. (2017). *Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C.,PTAR, Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales*.
- Córdoba, D. A. (1969). Mesozoic stratigraphy of northeastern Chihuahua, México. *The border region, 20th Field Conference Guidebook. New México Geological Society*, (págs. 91-96).
- Crites, R., Tchobanoglous, G., Camargo, M., & Pardo, L. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Bogotá: McGraw-Hill .



- Custodio, E. (2002). *Aquifer overexploitation: what does it mean?* (Vol. 10). Hydrogeology Journal .
- Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* . Cengage Learning.
- Diario Oficial de la Federación . (2018). Acuerdo por el cual se actualiza la disponibilidad de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican. Ciudad de México, México.
- Dillon, P. P. (2009). Recarga Gestionada de Acuíferos: Una introducción, Comisión Nacional del agua. (13).
- Domenico, P., & Schwartz, F. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Edmunds, W. M. (2004). Química del Agua Subterránea en la Zona no Saturada. *Hydrogeology Journal*.
- Escalante, E. F. (2005). Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia). *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 14(3), 140-147.
- Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. *ScieELO*(89).
- Espino, M. (2016). Apuntes de clase: Hidrogeoquímica. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Espino, M. S., Dagda, A., Villalba, M. D., & Silva, H. (2017). Destilación Solar de un Efluente de Tratamiento Secundario de Aguas Residuales para Recarga de Acuíferos. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 4(11), 15-21.
- Fernández-Escalante, E., Gil, R. C., Fraile, M. Á., & Serrano, F. S. (2014). Economic assessment of opportunities for Managed Aquifer recharge techniques in Spain using an advanced geographic information system (GIS). *Water*, 6(7), 2021-2040.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington, D.C.: Mundi-Prensa Libros S.A.
- Freeze, R., & Banner, J. (1970). The mechanism of natural ground-water recharge and discharge laboratory column experiment and field measurement. *Water Resources Research*, 7(1), 138-155.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Freitas, D. A., Cabral, J. J., Paiva, A. L., & Molica, R. J. (2012). Application of bank filtration technology for water quality improvement in a warm climate: a case study at Beberibe River in Brazil. *Journal of Water Supply: Reserach & Tecnology-Aqua*, 61(5), 319-330.
- Gale, I. (2005). Estrategias para la gestión de la recarga de acuíferos. UNESCO. París.
- Goldewijk, K., Beusen, & Janssen. (2010). Long-term dynamic modeling of global population and built-up area in a spatially explicit way: HYDE 3.1 Holocene. (20), 565-73.
- Gutiérrez, C. (2016). *Recarga Artificial de Acuíferos*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua , La Serena, Chile.
- Guymon, G. (1994). *Unsaturated zone hydrology*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Hernández, M. A. (2001). La importancia de la zona no-saturada en la hidrología de llanuras. *Anales Acad. Nac. de Cs, Ex., Fís y Nat.*, 73-82.
- INEGI. (2004). *Anuario Estadístico del Estado de Chihuahua*. México .
- INEGI. (2004). *Guía para la interpretación de cartografía: edafología*. Aguascalientes, México.
- INEGI. (2004). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Chihuahua*.



- Jiménez, G. (2013). *Caracterización de la cuenca del río San José en Arica para la evaluación a nivel de perfil de un sistema de recarga artificial de acuíferos*. Santiago: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas .
- Kanae, Oki, T., & Shinjiro. (2006). Global hydrological cycles and world water resources Science. 313, 1068-1072.
- Kung, K. (1990). Preferential flow in a sandy soil: 2. Mechanism and implications. *Geoderma*, 46(1-3), 59-71.
- Lecca, E. R., & Lizama, E. R. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial* , 17(1), 71-80.
- Lewis, J., & Sjostrom, J. (2010). Optimizing the Experimental Desing of Soil Columns in Saturated and Unsaturated Transport Experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*(115), 1-13.
- Moreno, D. (2015). *Recarga Artificial de Acuíferos en la Cuenca del Río Maule: Determinación de Sectores Favorables y Evaluación Económica*. Santiago de Chile.
- Moreno, M. V., & Rivera, A. O. (2011). Cretácico Tardío-Eoceno medio en el noroeste de México, evolución el arco magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide). *Boletín 118 del Instituto de Geología*, 2.
- Narsilio, G. A., & Santamarina, J. C. (2016). Clasificación de Suelos: Fundamento Físico, Prácticas actuales y recomendaciones. *Georgia Institute of Technology*.
- ONU. (1987). *Nuestro futuro común (Informe de la Comisión Brundtland)*. Reino Unido.
- Paredes, J. (2013). *Importancia del agua*.
- Peña, M. E., Ducci, J., & Plascencia, V. Z. (Mayo de 2013). *Banco Interamericano de Desarrollo*. Obtenido de Tratamiento de aguas residuales en México: <http://www.iadb.org>
- Polanco-Rodriguez, A. (2009). *Manual de prácticas de laboratorio de mecánica de suelos*. Chihuahua: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Ramallo, R. (1991). *Tratamientos de aguas residuales* . Reverté.
- Rojas, R. (2002). Curso Internacional Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales. *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales* . Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Ruiz, N., Velásquez, E., Pando, A., Decaens, T., & Dubs, F. (2009). *Indicadores sintéticos de la calidad del suelo* . Paris.
- Salazar, R., Szidarovsky, F., & Rojano, A. (s.f.). *Water Distribution Scenarios in the Mexican Valley* (Vol. 24). Water Resources Management.
- Saldierna-Ramos, J., Garza-Requena, F. D., Ventura-Houle, R., Heyer-Rodríguez, L., & Salinas-Castillo, W. (2014). Agua subterránea: Fuente de vida bajo nuestros pies, y su administración en regiones áridas . *Índice de Revistas Mexicanas de Divulgación Científica y Tecnológica* , 7(1).
- Samper, J., & Ayora, C. (1993). Acoplamiento de Modelos de Transporte de Solutos y de Modelos de Reacciones Químicas. *Estudios Geológicos*, 233-238.
- Sanders, L. (1998). *A manual of Field Hydrogeology*. Prentice-Hall.
- Secretaría de Salud. (1994). Modificación a la NOM-127-SSA1-1994. *Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para para su potabilización*. Ciudad de México, México .
- Serieys, N. (2004). *Impacto de la Recarga Artificial Sobre la Calidad del Agua en Acuíferos Sensibles de la Sabana de Bogotá*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Siebert, Burke, Faures, Frenken, Hoogeveen, Döll, & Portmann. (2010). Groundwater use for irrigation—a global inventory Hydrol. Earth Syst. Sci. 14, 1863-80.



- Stephens, D. (1996). *Vadose Zone Hydrology*. Florida: Lewis Publishers.
- Tamayo, J. (1982). *Geografía moderna de México*. México: Trillas.
- Tarango, G., & Reyes, I. (1994). Ruta de la IV Excursión geológica al Mesozoico de Chihuahua: parada Sierra del Cuervo. *Chihuahua*, 22-27.
- Tuinhof, A., Foster, S., Kemper, K., Garduño, H., & Nanni, M. (2006). Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea . Washington, D.C., Estados Unidos : Banco Mundial, GW MATE.
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., & Prasanna, M. (2011). *Evaluation of groundwater suitability for domestic, irrigational and industrial purposes: a case study from Thirumanimuttar river basin, Tamilnadu, India*. (Vol. 184). Environmental Monitoring and Assessment.
- Vígolo, J., Almeida, C. d., Silva, E. B., Stefan, C., Júnior, G. B., Gadelha, C. L., & Walter, F. (2018). Managed aquifer recharge: study of undisturbed soil column tests on the infiltration and treatment capacity using effluent of wastewater stabilization pond. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 23, 1-9.
- WHO. (9 de diciembre de 2019). *Organización Mundial de la Salud* . Obtenido de https://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/es/
- Wolleben, J. (1965). Nomenclatura litoestratigráfica de las unidades del Cretácico Superior del oeste de Texas y el noreste de Chihuahua. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 28, 65-74.
- Wu, G., Li, L., Ahmad, S., Chen, X., & Pan, X. (2013). *A dynamic Model for Vylnerability Assessment of Regional Water Resources in Arid Areas: A case Study of Bayingolin, China* (Vol. 27). Water Resources Management.



Curriculum Vitae



Ana Luisa Armendáriz Hernández

Teléfono móvil: (614) 1027141

Correo electrónico: ana.armendariz0792@gmail.com

Objetivo / perfil profesional

Interesada en desarrollar mi formación y experiencia profesional como Ingeniero, en una empresa donde se promueva el trabajo en equipo y se fomente el compañerismo, utilizando las matemáticas, ya que es la base de mi preparación.

Formación académica

- 2007 – 2010** Auxiliar de Informática.
Colegio de Bachilleres del Estado de Chihuahua, plantel No. 10
En los módulos de: operar las herramientas de cómputo, elaborar hojas de cálculo, preservar el equipo de cómputo, elaborar presentaciones gráficas, elaborar documentos en procesadores de texto.
- 2010 – 2015** **Titulado programa educativo Ingeniero Geólogo.**
Universidad Autónoma de Chihuahua.
- 2016 – 2017** **Diplomado de Inglés de la Facultad de Filosofía y Letras, UACH.**
- 2018 – 2020** **Maestría en Ingeniería en Hidrología con opción a subterránea, UACH.**

Experiencia

Prácticas profesionales:

AHMSA, Minera del Norte, Unidad Hércules.
Grupo México, Unidad Santa Eulalia, Mina San Antonio.
Grupo Cementos de Chihuahua.



Habilidades y competencias

Programas: Paquete de Office (Excel, Word, PowerPoint), AutoCad, ArcGis, Google Earth.

Participación de proyectos: Proyecto de investigación entre la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) y la World Wildlife Fund (WWF) – Fundación Río Arronte titulado “Estudio de Almacenamiento, inducción y recarga de agua de lluvia en acuíferos de Chihuahua, Chih, México”. Realicé columnas de suelo para la identificación de posibles contaminantes en el acuífero de Tabalaopa – Aldama, Chihuahua, Chih; México.

Idiomas: Español e Inglés

Pasatiempos: Hacer deporte.

Información adicional

Generales: Mexicana, soltera, 28 años.